

岩溶碳循环调查与碳汇效应评价指南

Guidance for karst carbon cycle surveying and carbon sink evaluation

点击此处添加与国际标准一致性程度的标识

(报批稿)

(本稿完成日期：2020年12月6日)

2021 - XX - XX 发布

2021 - XX - XX 实施

目 次

前言.....	III
引言.....	IV
1 范围.....	1
2 规范性引用文件.....	1
3 术语与定义.....	1
4 总则.....	2
4.1 目的任务.....	2
4.2 基本要求.....	2
4.3 技术方法.....	3
4.4 工作流程.....	3
5 调查内容.....	4
5.1 碳酸盐岩风化溶解消耗大气/土壤 CO ₂ 发生条件调查.....	4
5.2 岩溶碳循环过程调查.....	4
6 野外调查与监测.....	4
6.1 资料收集.....	4
6.2 岩石地球化学调查.....	4
6.3 土壤地球化学调查.....	5
6.4 碳酸盐岩溶蚀速率调查.....	5
6.5 大气/土壤 CO ₂ 浓度调查.....	6
6.6 植被生物量调查.....	6
6.7 岩溶洞穴动态监测.....	7
6.8 水文地球化学调查.....	7
6.9 水-气界面 CO ₂ 交换调查.....	8
6.10 水生生物固碳效率调查.....	8
6.11 沉积物碳含量/储量调查.....	9
6.12 地表水和地下水动态监测.....	9
7 流域岩溶碳汇通量评价.....	10
7.1 评价内容.....	10
7.2 评价方法.....	10
8 图件编制.....	10
8.1 编图一般要求.....	10
8.2 基础图件.....	10
8.3 成果图件.....	10
8.4 岩溶碳循环调查实际材料图.....	11

8.5 岩溶流域碳汇强度分布图	11
9 成果报告编写与提交	11
9.1 成果报告编制	11
9.2 成果提交	11
附录 A（规范性） 岩溶碳循环及碳汇效应调查表格式	12
附录 B（资料性） 溶蚀试验方法与计算	30
附录 C（资料性） 饱和指数（SI）和 CO ₂ 分压（P _{CO₂} ）计算公式	31
附录 D（资料性） 水生植物岩溶碳汇量计算	32
附录 E（资料性） 碳酸溶蚀碳酸盐岩产生的溶解无机碳	36
附录 F（资料性） 水-气界面 CO ₂ 交换通量估算方法	37
附录 G（资料性） 流域内源有机碳	39
附录 H（资料性） 沉积物碳沉积速率及来源计算	40
附录 I（资料性） 流域无机碳输出量	43
附录 J（资料性） 流域碳汇强度及通量	44
附录 K（资料性） 成果报告编写提纲	45
参考文献	46

前 言

本文件按照GB/T1.1-2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

本文件由中华人民共和国自然资源部提出。

本文件由全国自然资源与空间规划技术委员会（SAC/TC 93）归口。

本文件起草单位：中国地质科学院岩溶地质研究所。

本文件主要起草人：曹建华、覃小群、张连凯、黄奇波、黄芬、张春来、刘朋雨、于爽、吴夏、孙平安、何师意、张强、章程、黄思宇、王培、杨慧、蒲俊兵、李强、梁月明、黄妮。

引 言

碳酸盐岩风化溶解消耗大气/土壤CO₂，并随水流经过迁移、转化等一系列动态过程，积极参与全球碳循环，产生短时间尺度碳汇效应。中国碳酸盐岩分布面积约344.6万平方公里，占国土面积的三分之一，其中岩溶碳汇通量与森林碳汇量处于相同数量级。开展岩溶流域碳循环调查，查明岩溶碳循环形成条件、影响因素、迁移转化、源汇计算，评价岩溶碳汇通量，为固碳增汇和减缓气候变化的战略决策做出贡献。为进一步规范我国岩溶流域碳循环调查及碳汇效应评价工作，在大量的调查研究工作基础上，制定本文件。

岩溶碳循环调查与碳汇效应评价指南

1 范围

本文件提供了岩溶碳循环调查和碳汇效应评价的目标任务、工作内容、基本要求、工作量定额、碳汇计算、图件编制、报告编写与提交等方面的技术指导和建议。

本文件适用于 1:50 000 重点调查区和 1:250 000 一般调查区岩溶碳循环调查和碳汇效应评价。1:500 000 和 1:1 000 000 岩溶碳循环调查及碳汇效应评价亦可参照使用。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

DZ/T 0282-2015 水文地质调查规范（1:50 000）

DZ/T 0288-2015 区域地下水污染调查评价规范

3 术语与定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

岩溶流域 karst catchment

碳酸盐岩面积不小于10%、重碳酸根浓度不小于 1 mmol L^{-1} 、水化学类型为重碳酸根型的地表或地下水系的流域范围。

3.2

岩溶碳循环 karst carbon cycle

在岩溶流域中，碳酸盐岩风化溶解消耗大气或土壤 CO_2 形成无机碳，并在物理、化学和生物作用下碳形态相互转化和迁移的过程。

3.3

岩溶碳汇效应 karst carbon sink

在岩溶流域中，通过碳酸盐岩的溶蚀作用将消耗的大气/土壤 CO_2 以溶解无机碳（DIC）、溶解有机碳（DOC）和惰性有机碳（RDOC）的形式保留或固定在水圈、生物圈中的过程和通量。

3.4

岩溶碳汇通量 karst carbon flux

单位时间岩溶碳循环产生的碳汇量。

注：岩溶碳汇通量的单位为吨每年。

3.5

岩溶碳汇强度 **karst carbon intensity**

单位面积、单位时间岩溶碳循环产生的碳汇量。

注：岩溶碳汇强度的单位为吨每平方千米每年。

3.6

内源有机碳 **autochthonous organic carbon**

在地表水体中，由水生生物光合作用固定溶解无机碳产生的有机碳。

3.7

外源有机碳 **allochthonous organic carbon**

在地表水体中，因土壤侵蚀、流域冲刷输入的有机碳。

4 总则

4.1 目的任务

查明流域范围内碳酸盐岩风化溶解产生的无机碳，经过转移、转化、沉积的一系列动态过程，分析碳源汇关系，评价流域尺度的碳汇通量和碳汇效应，为区域碳循环研究、政府决策、节能减排提供参考依据。

4.2 基本要求

4.2.1 宜考虑在已开展相同比例尺区域地质、水文地质或环境地质调查的区域开展工作。

4.2.2 调查可分为 1:50 000 重点调查区和 1:250 000 一般调查区。重点调查区主要部署于具有区域代表性的岩溶流域。调查主要技术定额参考 DZ/T 0282-2015，具体见表 1：

表1 岩溶碳汇过程调查每百平方千米工作量

	类别	观测点 (个)	水点(个)	地质点 (个)	土壤点 (个)	植被样 方(个)	水生生 物样方 (个)	溶蚀试 片点 (个)	大气/土壤 CO ₂ 测量 点(个)
重点区调查 (1:50 000)	裸露区	80~120	20~25	10~15	10~15	5~10	5~10	15~20	15~25
	覆盖区	40~60	10~12	5~10	5~10	2~4	2~4	8~10	8~10
一般区调查 (1:250 000)	裸露区	2~5	1~2	0.5~0.6	0.4~0.8	0.4~0.8	0.5~3	0.4~0.8	0.4~0.8
	覆盖区	1~2	0.5~1	0.2~0.3	0.2~0.4	0.2~0.4	0.2~1.5	0.2~0.4	0.2~0.4

4.2.3 工作量定额宜包括收集到资料中经核实对本调查有效的工作量。

4.2.4 调查区内有高山峡谷、高原多年冻土、军事管制区等特殊地区的技术定额，可根据实际情况确定。

4.3 技术方法

4.3.1 碳酸盐岩溶解消耗大气/土壤 CO₂ 发生条件可采用水文、岩石、土壤、植被地球化学和大气/土壤 CO₂ 浓度调查等方法。

4.3.2 岩溶碳循环过程调查可采用大气/土壤 CO₂ 浓度、水-气界面 CO₂ 交换调查、碳酸盐岩溶蚀速率调查、岩溶洞穴动态监测调查等方法。

4.3.3 岩溶碳汇效应评价可采用水生生物固碳效率、沉积物碳含量/通量调查、地表水和地下水动态监测等方法。

4.3.4 调查方法宜加强新技术、新方法和新理论的应用，体现科学性、先进性和实用性。

4.4 工作流程

岩溶碳循环调查与碳汇效应评价宜包括：编制工作方案、野外调查、碳汇强度和通量分析评价、编制和完成等过程，建议的调查与评价流程见图1。

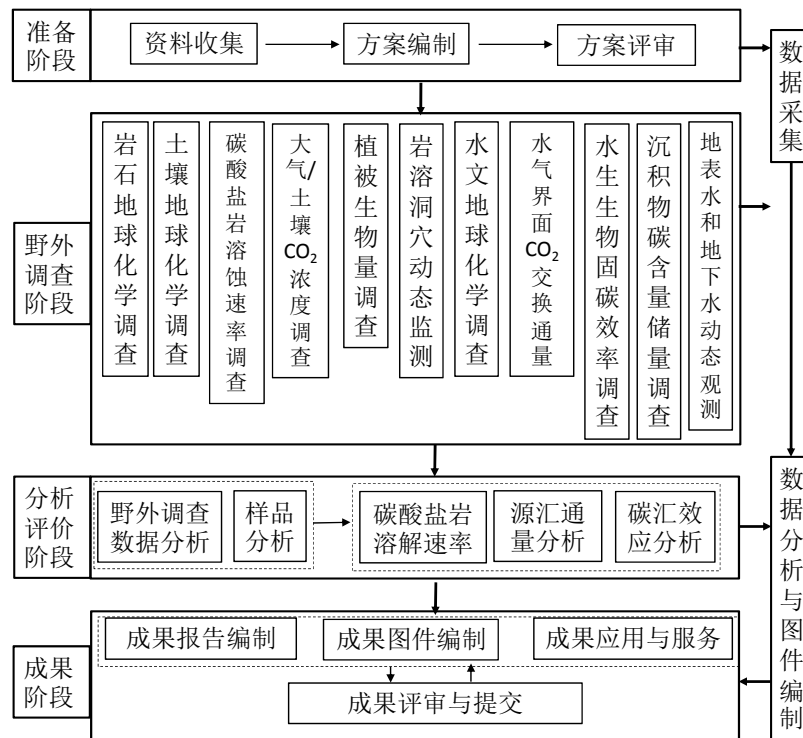


图1岩溶碳循环调查与碳汇效应评价流程图

5 调查内容

5.1 碳酸盐岩风化溶解消耗大气/土壤 CO₂ 发生条件调查

- a) 气候条件：气温、降雨量、蒸发量和太阳辐射等因子，分析其动态变化特征；
- b) 地形地貌：高程、坡度 地貌类型、岩溶形态，查明空间分布及组合特征；
- c) 地层构造：岩石组合特征、碳酸盐岩分布及石膏、硫化物、煤系地层分布情况，查明岩石地球化学和构造类型、部位特征。
- d) 土壤植被：土壤类型、物理化学属性和土地利用方式，植被群落类型、组成及生物量，查明大气/土壤 CO₂ 浓度、土壤呼吸的空间和时间变化以及与植被、土壤类型的关系。
- e) 水文地质特征：水文地质结构，水动力条件和水化学特征，确定岩溶地下水系统的结构与边界，分析地下水的补给、径流、排泄条件及空间展布。

5.2 岩溶碳循环过程调查

流域尺度岩溶碳循环可分为3个阶段：

- a) 碳酸盐岩溶解、生成水体中的无机碳：在表层岩溶带中大气/土壤 CO₂ 生成水体中的溶解无机碳的过程中，调查大气/土壤 CO₂、土壤类型、岩石成分等影响因子对不同碳酸盐岩的溶蚀速率及其时空变化的影响；
- b) 无机碳在地下水中的迁移与变化：调查物理化学条件改变导致的溶解无机碳在地下岩溶含水介质中的迁移及在洞穴、岩溶泉/地下河的形态变化及通量；
- c) 碳在地表水中的迁移与变化：调查地表水体（河流、湖泊、水库）碳的形态及动态特征、水生生物将水体无机碳转化为有机碳的效率、碳沉积通量及沉积速率、水-气界面 CO₂ 交换通量、无机碳和有机碳的来源。

6 野外调查与监测

6.1 资料收集

建议收集自然地理、气象水文、区域地质、构造地质、水文地质、生态环境等资料。可收集社会经济概况、水、土、岩、矿产资源利用现状、发展规划及其它与碳循环相关的各种资料；

在降雨量、流量数据不足时，建议建立观测站收集；在岩溶地下河管道介质、地下河分水岭地带等重要或未查明地段建议采用物探、钻探、示踪等方法，确定地下水系统的结构与边界；

综合分析收集的资料，认真总结影响流域碳循环的地球化学、地质学、生态环境学等各种因素，明确碳循环调查重点问题。

6.2 岩石地球化学调查

6.2.1 采样点选择

宜考虑以四级或五级岩溶流域为单元，选择1~2条典型地层剖面，以同比例尺地质图图面反映的最小岩石地层单位为基本单元采集岩样。在采样的同时，填写岩溶碳循环调查表-地质点野外记录卡片（见附录A中表A.1）。

6.2.2 采样频度和时间

建议1次/流域，在平水期进行。

6.2.3 测试指标

宜测定岩石的有效孔隙度、重力给水度、渗透系数（或渗透率）等参数，宜测试化学成分指标： K_2O 、 Na_2O 、 CaO 、 MgO 、 TiO_2 、 Fe_2O_3 、 SiO_2 、S、酸不溶量、无机碳同位素。可在实验室进行相对溶解度试验。

6.3 土壤地球化学调查

6.3.1 采样点选择

区域调查宜选择不同植被类型覆盖、不同土地利用方式下的土壤剖面，土壤采样点宜考虑与岩样采样点、地下水采样点相配合。

重点调查区宜考虑有岩溶地下水系统的补给、径流、排泄区及不同的岩溶地貌部位的样点。

在进行土样采集过程中，建议观察记录采样点土壤类型、土地利用方式、植被类型、农药化肥使用情况以及采样点周围的环境，记录剖面厚度，分层及其质地、颜色、土层厚度等物理特征，按试坑（长1.2 m，宽0.8 m，深1.2 m）剖面采集样品，土层较薄时，剖面挖至母质层。样品采集建议分两种情况，一种按土壤发生层进行取样，用于分析土壤化学元素含量，另一种以土壤深度为依据，每10 cm采集一个样品，用于分析土壤有机碳和无机碳及其随深度的变化情况。填写岩溶碳循环调查表-土壤点野外记录卡片（见附录A中表A.2）。

6.3.2 采样频度和时间

建议1次/年，平水期采集。

6.3.3 测试指标

现场宜测定土壤水分、温度、电导率。实验室宜测定无机碳、营养元素（全氮、全磷、全钾、速效氮、有效磷、速效钾）、土壤总有机碳、溶解有机碳、有机碳同位素、盐基离子、铵态氮、硝态氮、其他土壤化学成分（建议为 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 CaO 、 MgO 、 K_2O 、 Na_2O 、 MnO 、 P_2O_5 、烧失量）、土壤pH值、土壤物理性质（土壤容重、粒度、机械组成）等。

6.4 碳酸盐岩溶蚀速率调查

6.4.1 溶蚀试片埋放点的选择

建议选择在不同地层岩性及地貌部位如山顶、山腰、洼地、垭口等，并考虑不同植被类型覆盖、不同土地利用方式，埋放点宜考虑与岩土样、土壤样、水样采样点配套。布点位置建议控制地下水系统的补给、径流、排泄区。

6.4.2 采样频度和时间

考虑枯水期、丰水期、平水期水文和土壤 CO_2 动态特征，采样建议在每年的1，4，7和11月采集，4次/年。

6.4.3 埋放方法和埋放时间参见附录B，填写岩溶碳循环调查表-溶蚀试验野外记录卡片（见附录A中表A.3）。

6.5 大气/土壤 CO₂ 浓度调查

6.5.1 测试点选择

建议选择在不同地层岩性及地貌部位如山顶、山腰、洼地、垭口等，并考虑不同的植被类型覆盖、不同土地利用方式。宜考虑岩溶地下水系统的补给、径流、排泄区及不同的岩溶地貌部位的测试点。非岩溶区宜选择对应的2个以上的测试点，进行对比。在工矿大气污染区或石漠化区，宜布设测试点。

6.5.2 采样频度和时间

考虑枯水期、丰水期、平水期水文特征，采样建议变化较小区域在每年的1和7月采集，2次/年。变化较大区域建议在每年的1，4，7和11月采集，4次/年。

6.5.3 测定方法

土壤CO₂：一般区，用10~15 mm直径钢钎打土孔至相应土下位置，首先宜考虑用CO₂测试泵和测试管检测，每10 cm测定一次土壤CO₂浓度，土深超过1 m，测量到1 m；重点区挖试坑从表层到基岩，按照每10 cm埋CO₂收集和测试装置，回填原位土壤15天后，定时用CO₂测试泵和测试管检测不同层位CO₂浓度，了解土壤CO₂动态。

土-气界面CO₂逸出通量宜采用容器收集-气象色谱法测定。

大气CO₂：从0~4.5 m，按每0.5m间隔测定，填写岩溶碳循环调查CO₂测定野外记录卡片（见附录A中表A.4）。

6.6 植被生物量调查

6.6.1 遥感反演植被生物量

草地和农作物生物量遥感反演可采用经验统计方法，可用的植被指数有正交差值植被指数(NDVI)、增强型植被指数(EVI)、土壤调节植被指数(SAVI)等。NDVI宜在生物量较低的草地或农田使用；SAVI宜在生物量不高且土壤裸露较多的情况下使用；EVI宜在植被生物量较高时使用。

森林地上生物量的遥感反演宜采用融合机载激光雷达(LiDAR)和光学遥感数据的统计方法。具体的实现方法可包括：

- 通过野外实验获取 LiDAR 数据及森林地上生物量观测数据；
- 利用 LiDAR 提取的森林结构形态参数（如点云高度/密度），构建这些参数与地面实测的森林地上生物量之间的统计关系；
- 构建 LiDAR 提取的森林结构参数与和对应光学影像特征参数（如影像纹理、植被指数）之间的统计关系，以大尺度覆盖的光学影像为桥梁，获取区域尺度的森林地上生物量。

6.6.2 地面植被样方调查验证

农作物和草地生物量宜通过破坏性的收获法获取，具体做法为：

- 在一个大的区域（如 30 m×30 m）内可布设 5 个 1 m×1 m 的样方（4 个位于角点，一个位于对角线的交叉点上），利用收获法得到每个样方的生物量，取 5 个样方生物量的平均值作为真值来验证遥感数据反演的对应像元的生物量。

——森林地上生物量可采用每木检尺的方法获取，在一片长势相对均一的森林区域，选择一块标准样地（其大小可以与遥感影像像元的空间分辨率相对应），测量该样地内每棵树的胸径和树高。利用前人已经建立的不同树种胸径或树高与森林地上生物量之间的统计关系，计算得到样地生物量作为遥感影像单个像元所对应的真实森林地上生物量。

——填写岩溶碳循环调查植物群落野外调查记录卡片（见附录 A 中表 A.5, A.6, A.7, A.8）。

6.7 岩溶洞穴动态监测

6.7.1 监测网布置基本要求

岩溶洞穴监测点宜选择饱气带洞穴和有地下河发育的洞穴，包气带洞穴宜选择顶板薄、地表植被覆盖好的洞穴。

6.7.2 监测内容和监测频率：

可现场测试洞穴内外部气温、湿度、CO₂，滴水滴速、滴量、水温、电导率、pH值、CO₂、Ca²⁺含量、HCO₃⁻含量等，取样监测指标可包括大气降水、滴水以及土壤水、洞穴碳酸盐沉积物等的碳同位素组成，填写岩溶碳循环调查表-洞穴环境、滴水野外记录卡片（见附录A中表A.9, A.10）。

暴雨监测：宜在降雨前1天直至降雨结束后3-5天取样，根据降雨量推测岩溶渗流带的滞水时间，每1天或者2天监测一次（也可根据实际降水集中程度加密监测），同时取样，现场监测与取样监测指标与上述同。

6.8 水文地球化学调查

6.8.1 采样点选择

采样点的布设宜综合考虑区域水文地质、地形地貌，土地利用方式、土壤类型，岩溶地下水系统的补给、径流、排泄区，地下水资源计算单元等情况，选择能了解和认知调查区岩溶碳循环变化过程的代表性水点。

岩溶地下水系统中的岩溶泉、天窗、地表水和地下河出口宜取样，溶潭、水井、洞穴滴水可取样。当天然水点不能满足采样密度时，宜考虑采用人工钻井（农用井、工矿企业供水井等）采集地下水样品。在进行地下水样采集过程中，宜观察记录采样点周围地质、生态、水文，填写岩溶碳循环调查表-地下水野外记录卡片（见附录A中表A.11）。

调查区地表水采样点宜选在河流上游、中游和下游，或考虑在河流叉口的上方和下方分别取样，宜与水文观测站点相结合。可根据不同河流宽度和深度确定取样点位：河流宽度≤50 m，一条垂线（中泓线--河道中各横断面水流最大流速点的连线）；50~100 m，两条垂线（近左、右岸明显水流处）垂向1/2处；>100 m，三条垂线（垂向1/4，1/2，3/4处）。河流深度≤5 m，距上层0.5 m处一点；5~10 m，距上层0.5 m，距河底0.5 m处各取一点；>10 m，上中下即距上层0.5 m，水深1/2处，距河底0.5 m处，各取1点，最后把同深度的水样进行混合。岩溶区的湖泊和水库通常有岩溶地下河、大泉补给，可参考以上河流采样方法在上游、中游、下游布置采样点，填写岩溶碳循环调查-地表水野外记录卡片（见附录A中表A.12）。

酸雨沉降的地区可布置3个降雨接收点，正常区域宜布置2个降雨接收点。

6.8.2 采样频度和时间

考虑雨季、旱季或枯水期、丰水期、平水期水文特征，采样建议在每年的1，4，7，11月进行，4次/年。

6.8.3 测试指标

现场宜测定采样点的流量、水温、电导率、pH值、Ca²⁺含量、HCO₃⁻含量。室内宜分析水中的Ca²⁺、Mg²⁺、K⁺、Na⁺、Cl⁻、SO₄²⁻、NO₃⁻、HCO₃⁻、CO₂、Sr²⁺、SiO₂、悬浮固体、溶解有机碳（DOC）、颗粒有机碳（POC）及其碳同位素，计算饱和指数（SI）和CO₂分压（P_{CO2}），计算方法参见附录C。采样和测试技术要求按DZT0288-2015执行。

6.9 水-气界面 CO₂ 交换调查

6.9.1 测试点选择

地表河宜选择上、中、下游控制断面；湖泊宜选择进水区、湖心区、出水区；水库宜选择库首、库中、库尾。

6.9.2 采样频度和时间

考虑枯水期、丰水期、平水期水文特征，在变化较小区域建议每年的1和7月采集，2次/年。在变化较大区域建议每年的1，4，7和11月采集，4次/年。

6.9.3 测定指标和方法

现场宜测定采样点的流量、水温、电导率、pH值、Ca²⁺含量、HCO₃⁻含量、水面上方风速、水面CO₂浓度。室内宜分析水中的Ca²⁺、Mg²⁺、K⁺、Na⁺、Cl⁻、SO₄²⁻、NO₃⁻、HCO₃⁻、CO₂、Sr²⁺、SiO₂、悬浮固体、DOC、POC及其碳同位素。

6.10 水生生物固碳效率调查

6.10.1 测试点选择

地表河宜选择上、中、下游控制断面；湖泊宜选择进水区、湖心区、出水区；水库宜选择库首、库中、库尾。

6.10.2 采样频度和时间

建议2次/年，分别在1月和7月采集。

6.10.3 测定指标和方法

宜在典型河流设置水生植物采集样方，定性描述水生植物类型、名称，数量，计算水生生物生物量。取样测试水生植物的TOC/TN比值，δ¹³C值。填写岩溶碳循环调查水生植物野外记录卡片（见附录A中表A.13）。水生生物固碳效率参见附录D。

6.11 沉积物碳含量/储量调查

6.11.1 测试点选择

地表河宜选择上、中、下游控制断面；湖泊宜选择进水区、湖心区、出水区；水库宜选择库首、库中、库尾。

6.11.2 采样频度和时间

建议1次/流域，平水期采集。

6.11.3 测定指标和方法

宜取样测定沉积物中有机碳含量、有机质稳定碳同位素、总氮、 ^{210}Pb 和 ^{137}Cs 。可用同位素计算地表水体（河流、湖泊、水库）沉积物中碳沉积通量及沉积速率，沉积物中内源有机碳的比例。

6.12 地表水和地下水动态监测

6.12.1 地下水岩溶碳汇过程的动态监测

6.12.1.1 监测网布置基本要求

地下水动态监测网的布置宜考虑控制区域地下水动态变化规律，建议按不同地下水系统，地下水的补给、径流、排泄区，外源水的汇流区以及人类活动影响地带（矿区、居民地），不同含水层（组）、不同土地利用方式等设置监测点，形成监测网络。

6.12.1.2 监测内容和监测频率

重点流域建议安装自动化在线多参数水化学监测仪，实现在线监测水的温度、pH值、电导率、流量（水位）、溶解氧、降雨量等指标。根据水文情况设置记录频次，建议枯水期2小时1次，平水期1小时1次，丰水期半小时1次，洪水事件15分钟1次。仪器供电充足的情况可设置为每15分钟记录一组数据。

人工监测：建议1月/次，在雨季加密到每10天一次，同时取样。

暴雨监测：建议从降雨前2小时开始取样直到整场降雨结束后2小时（或洪峰过后）。每15分钟记录一组数据（仪器自动记录）；每1个小时或者2个小时记录一次，同时取样（人工记录）。现场监测指标宜包括水温、pH值、 HCO_3^- 含量、电导率、溶解氧、流量（水位），气温、降雨量等指标；取样监测指标宜包括碳同位素、碳形态及含量（POC、DOC）等。

6.12.2 地表水岩溶碳汇过程的动态监测

6.12.2.1 监测网布置基本要求

地表水监测点宜布置在河流入口、出口、汇流交叉处，水库、湖泊的入口、中部和出口段。监测点宜与水文观测站，或与具有水质在线监测功能站点相配套。

6.12.2.2 监测内容和监测频率

主要河流、湖泊、水库建议安装自动化在线多参数水化学监测仪，可实现在线监测水温、pH值、电导率、流量（水位）、溶解氧，气温、降雨量等指标。监测间隔建议设置为每15分钟记录一组数据。建议远程数据实时传输。没有实时传输条件时，可利用自动记录数据存储器，设计好记录时间间隔，保障1~2个月的监测数据的储存，携带笔记本、现场电缆下载数据。

洪水监测：建议从洪峰来临前2小时开始取样直到洪峰结束后2小时。每15分钟记录一组数据（仪器自动记录）；每1个小时或者2个小时记录一次，同时取样（人工记录）。现场监测指标宜包括水温、pH值、 HCO_3^- 含量、电导率、流量（水位）、降雨量、溶解氧等指标；取样监测指标宜包括碳同位素、碳含量（POC、DOC）等。

7 流域岩溶碳汇通量评价

7.1 评价内容

- a) 碳酸盐岩溶解速率：不同影响因素下碳酸盐岩的溶解速率及分区；
- b) 源汇分析：流域内碳源和碳汇的来源、比例及通量；
- c) 碳汇效应：流域内子单元碳汇强度和总通量。

7.2 评价方法

- a) 碳酸盐岩溶解速率可采用溶蚀试片数据计算，参见附录 B；
- b) 源汇分析宜包括无机碳中碳酸溶蚀碳酸盐岩比例，参见附录 E；水-气界面 CO₂ 交换通量，参见附录 F；流域内源有机碳，参见附录 G；有机碳沉积速率及来源，参见附录 H；流域碳输出量，参见附录 I。
- c) 碳汇效应：宜利用 GIS 以地层岩性为主要依据，考虑地形地貌、水文地质条件以及气象、植被、土壤等环境条件，划分子单元，进行碳汇强度计算。根据整个流域源汇分析结果，计算流域碳汇通量。计算方法参见附录 J。

8 图件编制

8.1 编图一般要求

8.1.1 岩溶碳循环调查图件可由基础图件和成果图件组成。

8.1.2 基础图件和成果图件比例尺建议为 1:50 000，选编成果图件依据实用性选定比例尺，也可作为必编成果图件的镶图。

8.1.3 所有图件均宜数字化，地理底图宜采用国家地理信息中心 1:50 000 地理底图空间数据库数据、2000 国家大地坐标系、高斯-克吕格地图投影。

8.2 基础图件

8.2.1 基础图件可包括：地形图、地质图、水文地质图、遥感影象图、地貌图、土地利用分区图、土壤类型图、植被类型图、岩石类型分布图、岩溶碳循环调查实际材料图。可根据实际情况合并或分解。

8.2.2 除岩石类型分布图、岩溶碳循环调查实际材料图外，基础图件宜引用现有图件，根据任务需要进行适当修编。

8.3 成果图件

8.3.1 建议岩溶流域碳汇强度分布图为必编成果图件。

8.3.2 选编图件，建议根据调查区实际情况选择，如碳酸盐岩溶蚀速率分区图、土壤 CO₂ 浓度分布图、植被生物量分布图等。

8.4 岩溶碳循环调查实际材料图

8.4.1 岩溶碳循环调查实际材料图是反映区域岩溶碳汇调查的工作程度、基本状况的基础性图件。

8.4.2 岩溶碳循环调查实际材料图基本内容：

- a) 第一层次：地理背景：由地形类、水系类、境界类、交通类、居民地等图层构成。
- b) 第二层次：调查工作程度分区。
- c) 第三层次：调查工作。表示完成的实际工作量。由地面调查线路、调查点、剖面线、采样点、实验测试、监测工程等图层组成。

8.5 岩溶流域碳汇强度分布图

8.5.1 碳汇强度分布图是反映岩溶流域碳循环的性质（源、汇）和强度的成果图件。

8.5.2 碳汇强度分布图基本内容：

- a) 第一层次：主要表示与岩溶碳循环相关的地理、气象因子，由地形类、水系类及降雨量、气温等值线等图层构成。
- b) 第二层次：主要表示与岩溶碳循环相关的地质、水文地质条件；如岩性分布、岩溶发育程度、水化学特征及地下水径流模数等内容。
- c) 第三层次：岩溶流域碳汇强度分区。

9 成果报告编写与提交

9.1 成果报告编制

9.1.1 成果报告宜充分利用已有资料，全面反映调查和测试所取得的成果。

9.1.2 报告宜做到内容简明扼要，重点突出，论据充分，结论明确，附图、附件齐全。

9.1.3 成果报告编写提纲参见附录 K。

9.2 成果提交

9.2.1 报告评审依据项目任务书、设计书、设计审查意见书、野外验收意见书及有关标准和要求进行。

9.2.2 报告评审后应根据评审意见认真修改，最终报告报送审批单位审查认定。

附录 A
(规范性)

岩溶碳循环及碳汇效应调查表格式

表A.1至表A.13给出了在岩溶碳循环调查中调查种类所需要的表格。

表A.1 岩溶碳循环调查-地质点野外调查记录卡片

统一编号		野外编号	室内编号	类型	
位置		省 市 (县) 乡(镇) 村(自然村)(方位) m			
图 幅	名称	经纬度	E: N:		
	编号	坐标	X: Y: Z:		
	比例尺	地层代号	地层产状		
地层、岩性	地质点主要包括(地层界线点, 岩石取样点) 地层查地质底图 岩性: 岩溶区: 白色/灰白色/灰色/深灰色、中厚层/薄层、灰岩/白云质灰岩/灰质白云岩/白云岩/泥灰岩 非岩溶区: 砂岩/花岗岩/变质岩				
地质构造	构造: 节理(数量、节理面的走向)、断层(断层性质(正、逆断层、平移断层)、走向、倾向、断层角砾岩)、褶皱(向斜、背斜)				
地形地貌	地形地貌: 峰丛洼地/峰林平原/岩溶峡谷/岩溶槽谷/坡立谷/断陷盆地/溶丘洼地(洼地规模、峡谷深度、走向等)。土壤: 颜色, 质地(砂土/粉砂土/壤土/、粘土), 结构(片状/棱柱状/柱状/角块状/半角块状/粒状)。植被类型、优势种、覆盖率、溶蚀洼地、峰林				
岩溶现象	个体岩溶形态: 溶洞、石林、石柱、溶沟、溶槽、深溶痕、漏斗、落水洞、表层岩溶泉, 地表钙华/蚀余红土/石灰土等。				

调查记录人: 互查人: 审核人: 日期: 年 月 日

表 A.1 岩溶碳循环调查-地质点野外调查记录卡片（续）

平面示意图	
剖面示意图	
备注	

表A.2 岩溶碳循环调查土壤野外记录卡片

统一编号		野外编号		类型		
位置	省 县 乡(镇) 村(自然村)(方位) m					
图幅名称		比例尺		经纬度 E: N:	天气	
图幅编号		坐标	X: Y: Z:	时间		
土层厚度		土样数量		分析类别	地形	
坡位		坡向		坡度	地层代号	
土壤中测试记录						
深度(cm)	水分(%)	土温(°C)	电导率($\mu\text{S cm}^{-1}$)	pH	颜色	土样编号
10						
20						
30						
40						
50						
60						
70						
80						
90						
100						
土壤容重测量记录						
深度	环刀编号	环刀质量(g)	环刀+湿土质量(g)	环刀+干土质量(g)		
测定指标	<input type="checkbox"/> 常规化学成分 <input type="checkbox"/> TN <input type="checkbox"/> TP <input type="checkbox"/> TK <input type="checkbox"/> 无机碳 <input type="checkbox"/> 有机碳 <input type="checkbox"/> $\delta^{34}\text{S}$ <input type="checkbox"/> $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ <input type="checkbox"/> $\Delta^{14}\text{C}$ <input type="checkbox"/> $\delta^{44}/^{42}\text{Ca}$ <input type="checkbox"/> $\delta^{13}\text{C}$ <input type="checkbox"/> 其他					
剖面描述	土壤：成因类型（石灰土、地带性土壤），质地（砂土/粉砂土/壤土/、粘土），土壤分层、根系、石块体积比例。					

调查记录人：

互查人：

审核人：

日期： 年 月 日

表 A.2 岩溶碳循环调查-土壤野外记录卡片 (续)

土地利用 方式及 覆被条 件	耕地(水田、旱地)/林地(有林地、疏林地、灌丛、草地)/园地/未利用地/ 主要植被, 覆盖率%等
剖面 示意 图	
平面 示意 图	
备 注	相片集名称: 相片编号:

表A.4 岩溶碳循环调查-CO₂测试野外记录卡片

统一编号		野外编号		测量仪器	
位置	省 市 (县) 乡(镇) 村(自然村)(方位) m				
图幅名称		比例尺		经纬度 E: N:	天气
图幅编号		坐标 X: Y: Z:			大气压 Pa
地形		地貌部位		坡向/坡度	
地层代号及岩性					
土壤中 CO ₂ 测试记录			大气 CO ₂ 测试记录		
深度 (cm)	CO ₂ (%)	土温 (°C)	离地高度 (cm)	CO ₂ (ppm)	气温 (°C)
-10			400		
-20			350		
-30			300		
-40			250		
-50			200		
-60			150		
-70			100		
-80			50		
-90			地面		
-100					
土地利用方式及覆被条件	耕地(水田、旱地)/林地(有林地、疏林地、灌丛、草地)/园地/未利用地/主要植被, 覆盖率%等				
相应的土壤点调查记录卡片编号					
备注	相片集名称: 相片编号:				

调查记录人: 互查人: 审核人: 日期: 年 月 日

表A.5 岩溶碳循环-植物群落野外调查记录卡片

统一编号		野外编号		室内编号		群落名称	
位置	省 市 (县) 乡(镇) 村(自然村)(方位) m						
图幅	名称		经纬度	E:	N:		
	编号		坐标	X:	Y:	Z:	
	比例尺		坡向		坡度		
样地面积		总盖度		群落高			
主要层 优势种							
群落外貌特点							
小地形及样地 周围环境							
分层及各层特点		层	高度		层盖度		
		层	高度		层盖度		
		层	高度		层盖度		
		层	高度		层盖度		
		层	高度		层盖度		
突出的生态现象							
地被物情况							
此群落还分布于何处							
人为影响方式和程度							
群落动态							

调查记录人: 互查人: 审核人: 日期: 年 月 日

表A.5 岩溶碳循环-植物群落野外调查记录卡片（续）

平面示意图	
照片	
备注	

表A.6 乔木层野外样方调查卡片

群落名称_____样地面积_____野外编号_____第_____页
 层次名称_____层高度__层盖度____调查时间_____记录者

采集号	植物野外名称	拉丁名	胸径	高度	盖度	物侯期	生活力	附记

表A.7 灌木层野外样方调查卡片

群落名称_____样地面积_____野外编号_____第_____页
 层次名称_____层高度__层盖度____调查时间_____记录者

植物野外名称	拉丁名	高度		冠径		基径		丛径		株丛数	盖度 (%)	物侯期	生活力	附记
		一般	最高	一般	最大	一般	最大	一般	最大					

表A.8 草本层野外样方调查卡片

群落名称_____样地面积_____野外编号_____第_____页
 层次名称_____层高度__层盖度____调查时间_____记录者

采集号	植物野外名称	拉丁名	花序高		叶层高		冠径		丛径		株丛数	盖度 (%)	物侯期	生活力	附记
			一般	最高	一般	最大	一般	最大	一般	最大					

表A.9 岩溶碳循环调查-岩溶洞穴环境野外调查记录卡片

统一编号		野外编号		洞穴类型		洞穴名称	
地理位置	省 市 县 乡(镇) 村(自然村)(方位) m						
图幅名称		比例尺		经纬度	E:	N:	
图幅编号		坐标	X:	Y:	Z:		
地质背景	地貌背景	峰丛、洼地、山腰、峰谷、垭口、孤峰、植被、土壤、覆盖层					
	地层岩性与产状						
	洞穴发育状况	规模、方向与走向, 控洞构造(构造、地层、裂隙等控制?)、洞穴发育程度, 开放-封闭程度、覆盖层厚度					
洞穴形态特征	廊道/洞道、裂隙、厅堂、洞穴空间分布						
洞穴沉积特征	化学沉积、机械沉积、坍塌、洞穴滴水、流水、地下河沉积、坍塌物						
洞穴环境测试记录							
编号	相对洞穴位置	气温 (°C)	RH (%)	大气压 (hPa)	CO ₂ (ppm)	备注	

调查记录人:

互查人:

审核人:

日期:

年 月 日

表 A.9 岩溶碳循环调查-岩溶洞穴环境野外调查记录卡片 (续)

平面剖面示意图	
备注	照片编号

表A.10 岩溶碳循环调查-岩溶洞穴滴水野外调查记录卡片

统一编号		野外编号		洞穴类型		洞穴名称	
地理位置	省 市 县 乡(镇) 村(自然村)(方位) m						
图幅名称		比例尺		经纬度	E:	N:	
图幅编号		坐标	X:	Y:	Z:		
地质背景综述	相对位置						
	地貌背景	峰丛、洼地、山腰、峰谷、垭口、孤峰、植被、土壤、覆盖层					
	地层岩性与产状						
	洞穴发育状况	规模、方向与走向,控洞构造(构造、地层、裂隙等控制)、洞穴发育程度,开放-封闭程度、覆盖层厚度					
洞穴形态特征	廊道/洞道、裂隙、厅堂、洞穴空间分布						
洞穴沉积特征	化学沉积、机械沉积、坍塌、洞穴滴水、流水、地下河沉积、坍塌物						
测定指标	<input type="checkbox"/> 全分析 <input type="checkbox"/> 简分析 <input type="checkbox"/> DOC <input type="checkbox"/> DIC <input type="checkbox"/> POC <input type="checkbox"/> PIC <input type="checkbox"/> TN <input type="checkbox"/> TOC <input type="checkbox"/> $\delta^{34}\text{S}$ <input type="checkbox"/> $\Delta^{14}\text{C}$ <input type="checkbox"/> $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ <input type="checkbox"/> $\delta^{13}\text{C}_{\text{POC}}$ <input type="checkbox"/> $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ <input type="checkbox"/> $\delta^{18}\text{O}$ <input type="checkbox"/> $\delta^2\text{H}$ <input type="checkbox"/> $\delta^3\text{H}$ <input type="checkbox"/> 其他						
洞穴滴水测试记录							
编号	水温(°C)	滴速(cpm)	pH	EC($\mu\text{S cm}^{-1}$)	$[\text{HCO}_3^-]$ (mmol L^{-1})	$[\text{Ca}^{2+}]$ (mg L^{-1})	备注

记录/调查人: 互查人: 审核人: 调查日期: 年 月 日

表A.11 岩溶碳循环调查表-地下水野外记录卡片

统一编号		野外编号			原编号或名称	指收集到的 工作基础图或报告	
位置			省 市(县)		乡(镇)	村(自然村)(方位) m	
图幅名称		比例尺		经纬度		E: N:	天气
图幅编号		坐标			X:	Y:	Z:
调查点类型	<input type="checkbox"/> 地下河出口 <input type="checkbox"/> 地下河进口 <input type="checkbox"/> 岩溶泉 <input type="checkbox"/> 裂隙泉 <input type="checkbox"/> 其他						
水的基本性质	气温	℃	色			HCO ₃ ⁻	mmol L ⁻¹
	水温	℃	嗅			Ca ²⁺	mg L ⁻¹
	pH		透明度			DO	mg L ⁻¹
	电导率	μs cm ⁻¹	污染现象			污染源	
测流记录	矩形堰(长宽高) 浮标法(d、s、t1、t2、t3) 流速仪测量(d、h、v1、v2、v3)						
	流量		测流方法			测流日期	
测定指标	<input type="checkbox"/> 全分析 <input type="checkbox"/> 简分析 <input type="checkbox"/> DOC <input type="checkbox"/> DIC <input type="checkbox"/> POC <input type="checkbox"/> PIC <input type="checkbox"/> TN <input type="checkbox"/> TOC <input type="checkbox"/> δ ³⁴ S <input type="checkbox"/> Δ ¹⁴ C <input type="checkbox"/> ⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr <input type="checkbox"/> δ ¹³ C _{POC} <input type="checkbox"/> δ ¹³ C _{DIC} <input type="checkbox"/> δ ¹⁸ O <input type="checkbox"/> δ ² H <input type="checkbox"/> δ ³ H <input type="checkbox"/> 其他						
地形地貌 土壤植被	地形地貌：峰丛洼地/峰林平原/岩溶峡谷/岩溶槽谷/坡立谷/断陷盆地/溶丘洼地（洼地规模、峡谷深度、走向等）。个体岩溶形态：石林、石柱、溶沟、溶槽、深溶痕、漏斗、落水洞、表层岩溶泉，地表钙华/蚀余红土/石灰土等。土壤：类型，颜色，质地（砂土/粉砂土/壤土/、粘土）。植被类型、优势种、覆盖率						
地层岩性 地质构造	地层及代号				地层产状		
	地层查底图，岩性：岩溶区：白色/灰白色/灰色/深灰色、中厚层/薄层、灰岩/白云质灰岩/灰质白云岩/白云岩/泥灰岩；非岩溶区：砂岩/花岗岩/变质岩等 构造部位：断层（断层性质（正、逆断层）、走向、倾向、断层角砾岩）；褶皱（向斜、背斜）；节理（数量、节理面的走向）						

记录/调查人： 互查人： 审核人： 调查日期： 年 月 日

表A.11 岩溶碳循环调查表-地下水野外记录卡片（续）

水文地质条件及水生植物发育情况	地下河/泉水出露位置（山腰、山脚、河谷等），地下河出口朝向，出口形状，发育层位，展布方向；底泥情况形成原因初步分析。动态变化（访问当地老乡）水生植物种类：挺水植物、沉水植物（黑藻、水绵、眼子菜等），生长情况
开采利用现状	
平面示意图	比例尺
剖面示意图	
备注	照片编号

表A.12 岩溶碳循环调查-地表水野外记录卡片

统一编号		野外编号		名称	(河流、水库)名	
位置	省 市 (县)		乡(镇)		村(自然村)(方位) m	
图幅名称	比例尺		经纬度	E:	N:	天气
图幅编号	坐标	X:	Y:	Z:		
调查点类型	<input type="checkbox"/> 河流 <input type="checkbox"/> 水库 <input type="checkbox"/> 湖泊 <input type="checkbox"/> 冰川 <input type="checkbox"/> 湿地 <input type="checkbox"/> 其他					
水的基本性质	气温	℃	色		HCO_3^-	mmol L^{-1}
	水温	℃	嗅		Ca^{2+}	mg L^{-1}
	pH		透明度		DO	mg L^{-1}
	电导率	$\mu\text{s cm}^{-1}$	Eh	mv	叶绿素	
测定指标	<input type="checkbox"/> 全分析 <input type="checkbox"/> 简分析 <input type="checkbox"/> DOC <input type="checkbox"/> DIC <input type="checkbox"/> POC <input type="checkbox"/> PIC <input type="checkbox"/> TN <input type="checkbox"/> TOC <input type="checkbox"/> $\delta^{34}\text{S}$ <input type="checkbox"/> $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ <input type="checkbox"/> $\Delta^{14}\text{C}$ <input type="checkbox"/> $\delta^2\text{H}$ <input type="checkbox"/> $\delta^{18}\text{O}$ <input type="checkbox"/> $\delta^{44/42}\text{Ca}$ <input type="checkbox"/> $\delta^{13}\text{C}$ <input type="checkbox"/> 其他					
地形地貌、 (地层岩性)	岩溶区：地形地貌：峰丛洼地/峰林平原/岩溶峡谷/岩溶槽谷/坡立谷/断陷盆地/溶丘洼地（洼地规模、峡谷深度、走向等）； 非岩溶区：高山、中山、低山、丘陵、平原等。地层岩性（查底图）；					
取样点 基本概况	描述： 河水深度、水流速度、河面宽度的调查；河流（水库、湖等）的位置（上、下游或进、出口等）； 取样点周边土地利用方式，如位于城区、工矿区、林地或草地等； 水面情况，有否养殖、污染情况、沉积物等					
水生植物 及藻类	盖度、种类，挺水、沉水					

调查记录人： 互查人： 审核人： 日期： 年 月 日

表A.12 岩溶碳循环调查-地表水野外记录卡片（续）

<p style="text-align: center;">平 面 示 意 图</p>	<p>比例尺</p> <p>河流横断面或湖泊水库垂向分层取样、测试可另画剖面图示</p>
<p>备注</p>	<p>照片编号（规范中制定规则）照片中勾画出界线视同剖面图</p> <p>测流记录：</p> <p>矩形堰（长宽高）</p> <p>流速仪测量(d、h、v1、v2、v3)</p> <p>浮标法(d、s、t1、t2、t3)</p> <p>水文站数据</p> <p>流量、测流方法</p>

表A.13 岩溶碳循环-调查水生植物野外记录卡片

统一编号		野外编号		名称	
位 置	省 市 (县) 乡(镇) 村 (自然村)				
图幅名称		比例尺		经纬度E: N:	天气
图幅编号		坐 标	X: Y: Z:		
调查点类型	<input type="checkbox"/> 河流 <input type="checkbox"/> 水库 <input type="checkbox"/> 湖泊 <input type="checkbox"/> 冰川 <input type="checkbox"/> 湿地 <input type="checkbox"/> 其他				
地形			坡向		坡 度
水的基 本性质	气 温	℃	色		HCO_3^- mmol L ⁻¹
	水 温	℃	嗅		Ca^{2+} mg L ⁻¹
	pH		透明度		DO mg L ⁻¹
	电导率	$\mu\text{s cm}^{-1}$	Eh	mv	叶绿素
测定指标	<input type="checkbox"/> 干重 <input type="checkbox"/> TN <input type="checkbox"/> TOC <input type="checkbox"/> $\delta^{13}\text{C}$ <input type="checkbox"/> $\Delta^{14}\text{C}$ <input type="checkbox"/> $\delta^2\text{H}$ <input type="checkbox"/> $\delta^{18}\text{O}$ <input type="checkbox"/> 其他				
取样点 基本概况					
备 注					

调查记录人: 互查人: 审核人: 调查日期: 年 月 日

表A.13 岩溶碳循环-调查水生植物野外记录卡片 (续)

平面 剖面 示意 图									
植物群落生物量调查表									
编号	部位/水深 (m)	样本 面积 (cm ²)	底质 类型*	盖度 (%)	层高 (cm)	名称	物候期**	湿重(g)	样品编号

注：底质类型*：a砾石b砂c淤泥；物候期**：A营养期、B花蕾、C抽穗、D开花期、E孢子期、F结果、G落果、H枯黄、G休眠或枯死。

附录 B
(资料性)
溶蚀试验方法与计算

B.1 CO₂ 汇计算分区

利用GIS以地层岩性为主要依据，考虑地形地貌、岩溶动力系统特征、水动力条件以及气象、植被、土壤等环境条件，进行CO₂汇计算分区，区域调查区每个计算分区代表面积宜<500km²；重点区调查分区代表面积宜<50km²；每个计算分区应有3组以上溶蚀试片测试点，如缺少溶蚀试验点，可参考地质与环境条件相近的计算区的溶蚀量进行计算。

B.2 溶蚀试片准备

B.2.1 溶蚀试片选材，选用纯度较高的 (>97%) 石灰岩制成相同大小的试片作为标准试片。

B.2.2 为了进行对比，可选择多组有代表性的调查区岩石制作试片。

B.2.3 岩石磨成直径4cm，厚0.3cm标准溶蚀试片，洗净，70℃烘至恒重，利用天平（精度：万分之一）称重后干燥器中冷却，编号。

B.3 埋放方法和埋放时间

B.3.1 溶蚀试片埋放点数，按（5~10）处/100km²。按试坑剖面埋放试片，土层较薄时，剖面挖至风化层即可。地上空气中（距地面100cm）、地表、土下20cm、土下50cm各埋放一组，每组3片。埋放时，应挖与试片大小相符小槽，把试片插进槽内。

B.3.2 在放置溶蚀试片时，同时检测试片相应放置地（距地面100cm、地表、土下20cm和50cm）CO₂浓度，用环刀取20cm和50cm深处原土柱，带回室内检测土壤含水量和容重，以便分析不同土地利用方式和植被条件下土壤的环境因子及其对碳酸盐岩溶蚀的影响作用。

B.3.3 溶蚀试片埋放周期为一年，一年后回收试片，利用天平称重。计算公式及方法如下：

$$F = E \times S \times R \times M_{CO_2} / M_{CaCO_3} \dots\dots\dots(B.1)$$

式中：

- F —CO₂的回收量，单位为 g a⁻¹；
- E —试片溶蚀量，单位为 g m⁻² a⁻¹；
- S —岩溶区面积，单位为 m²；
- R —岩石的纯度，单位为 %；标准试片以97%进行计算；
- M_{CO_2} —CO₂的分子量；
- M_{CaCO_3} —CaCO₃的分子量。

附录 C

(资料性)

饱和指数 (SI) 和 CO₂ 分压 (P_{CO2}) 计算公式

C.1 总则

可利用 PHREEQC 计算水中有关组分 (H⁺、Ca²⁺、H₂CO₃、HCO₃⁻) 的活度及方解石饱和指数 (SI_c)、白云石饱和指数 (SI_d) 和水的 CO₂ 分压 (P_{CO2})，需要的数据包括温度、pH 值、溶液中七种常规离子 (K⁺、Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺、Cl⁻、SO₄²⁻、HCO₃⁻) 的浓度。

C.2 饱和指数计算公式

$$SI_c = \lg \frac{[Ca^{2+}][CO_3^{2-}]}{K_c} \dots\dots\dots (C.1)$$

$$SI_d = \frac{[[Ca^{2+}][Mg^{2+}][CO_3^{2-}]^2]^{\frac{1}{2}}}{K_d} \dots\dots\dots (C.2)$$

式中：

SI_c—方解石饱和指数；

SI_d—白云石饱和指数；

K_c—方解石在某一温度下的平衡常数；

K_d—白云石在某一温度下的平衡常数；

[Ca²⁺]—Ca²⁺的活度；

[Mg²⁺]—Mg²⁺的活度；

[CO₃²⁻]—CO₃²⁻的活度。

当：

SI_c=0 或 SI_d=0 时，水中方解石或白云石正好饱和，处于平衡状态；

SI_c>0 或 SI_d>0 时，水中方解石或白云石过饱和，存在发生沉淀的趋势；

SI_c<0 或 SI_d<0 时，水中方解石或白云石未饱和，水还具有侵蚀性。

C.3 二氧化碳分压 (P_{CO2}) 计算公式

$$P_{CO_2} = \frac{[HCO_3^-][CO_3^{2-}]}{K_1 K_{CO_2}} \dots\dots\dots (C.3)$$

式中：

K₁—H₂CO₃的平衡常数；

K_{CO2}—CO₂的平衡常数。

附 录 D
(资料性)
水生植物岩溶碳汇量计算

D.1 参数记录

选取岩溶地下河补给的地表河段，将多参数水质分析仪分别放置于地下河出口处及地表河段的下游，分别自动记录水体的温度T、电导率Ec、溶解氧C，记录间隔为5 min，昼夜连续监测，并分别记录上述两监测点高程h；

D.2 饱和溶解氧计算

首先，利用溶解氧监测时对应时刻的水温计算该水温下水体的饱和溶解氧浓度C*，如式(D.1)：

$$\ln(C^*) = -139.34411 + \left(\frac{1.575701 \times 10^5}{T}\right) - \left(\frac{6.642308 \times 10^7}{T^2}\right) + \left(\frac{1.243800 \times 10^{10}}{T^3}\right) - \left(\frac{8.621949 \times 10^{11}}{T^4}\right) \dots\dots\dots(D.1)$$

式中：

C*—饱和溶解氧浓度，单位为 mg L⁻¹；

T—水温，单位为 °C。

其次，利用电导率校正饱和溶解氧浓度，如式(D.2)：

$$\ln(C^*) = -139.34411 + \left(\frac{1.575701 \times 10^5}{T}\right) - \left(\frac{6.642308 \times 10^7}{T^2}\right) + \left(\frac{1.243800 \times 10^{10}}{T^3}\right) - \left(\frac{8.621949 \times 10^{11}}{T^4}\right) - 6 \times 10^{-4} \times Ec \times \left\{ \left(1.7674 \times 10^{-2}\right) - \left(\frac{1.0754 \times 10}{T}\right) + \left(\frac{2.1407 \times 10^3}{T^2}\right) \right\} \dots\dots\dots(D.2)$$

式中：

Ec—电导率，单位为 μs cm⁻¹。

最后，利用大气压校正水体中饱和溶解氧浓度，如式(D.3)-(D.6)：

$$C_p = C^* \times \left(\frac{P - P_{wv}}{1 - P_{wv}}\right) \times \left(\frac{1 - \theta \times P}{1 - \theta}\right) \dots\dots\dots(D.3)$$

$$\ln(P) = 5.25 \times \ln\left(1 - \frac{h}{44300}\right) \dots\dots\dots(D.4)$$

$$\ln(P_{wv}) = 11.8751 - \left(\frac{38840.70}{T}\right) - \left(\frac{246961}{T^2}\right) \dots\dots\dots (D.5)$$

$$\theta = 9.672 \times 10^{-3} - 4.942 \times 10^{-5} \times T + 6.436 \times 10^{-8} \times T^2 \dots\dots\dots (D.6)$$

式中:

C_p —利用大气压校正后的饱和溶解氧浓度, 单位为 mg L^{-1} ;

P —大气压强, 单位为 KPa ;

P_{wv} —水汽分压, 单位为 KPa ;

P —非标准大气压, 单位为 KPa ;

h —高程, 单位为 m ;

θ —水汽参数。

D.3 计算水体中溶解氧饱和时的浓度与监测值之差

通过连续监测水体中溶解氧浓度数值计算获得 dC/dt 和 D , 然后利用式(7), 作 $ER_{\text{夜间}}$ 与 $K(O_2)$ 的线性关系, 得到河段夜间的呼吸作用 $ER_{\text{夜间}}$ 及复氧系数 $K(O_2)$:

$$dC/dt = ER_{\text{夜间}} - K(O_2)_{\text{夜间}} \times D \dots\dots\dots (D.7)$$

式中:

C —水体中溶解氧的浓度, 单位为 mg L^{-1} ;

t —时间, 单位为 min ;

$ER_{\text{夜间}}$ —水生植物的呼吸作用, 单位为 mg L^{-1} 当量氧气;

$K(O_2)_{\text{夜间}}$ —为夜间的复氧系数, 单位为 min^{-1} ;

D —氧亏, 单位为 mg L^{-1} , 即水体中溶解氧饱和时的浓度与监测值之差;

D.4 计算夜间水生植物的呼吸作用 $ER_{\text{夜间}}$ 及复氧系数 $K(O_2)$ 与温度之间的关系

利用步骤3得到的夜间水生植物的呼吸作用 $ER_{\text{夜间}}$ 及复氧系数 $K(O_2)$ 与温度之间的关系, 计算得出白天水生植物的呼吸作用 $ER_{\text{白天}}$ 、生态系统总呼吸作用 $ER_{\text{总}}$ 、复氧系数 $K(O_2)_{\text{白天}}$, 如式(D.8)-(D.11):

$$ER_{\text{白天}} = ER_{\text{夜间}} \times 1.072^{(T_i - T_{\text{夜间}})} \dots\dots\dots (D.8)$$

$$ER_{\text{总}} = ER_{\text{白天}} \pm ER_{\text{夜间}} \dots\dots\dots(D.9)$$

$$K(O_2)(T_i) = K(O_2)(T_n) \times 1.0241^{(T_i - T_n)} \dots\dots\dots(D.10)$$

$$K(O_2) = \overline{K(O_2)}_{\text{白天}}(T_i) \dots\dots\dots(D.11)$$

式中：

T_i —第*i*时间点的水温，单位为 °C；

$T_{\text{夜间}}$ —夜间水温，单位为 °C；

$ER_{\text{总}}$ —水生植物的呼吸作用，单位为 mg L^{-1} 当量氧气；

$K(O_2)_{\text{白天}}$ —白天的复氧系数，单位为 min^{-1} ；

T_n —第*n*时间点的水温，单位为 °C；

$\overline{K(O_2)}$ — $K(O_2)_{\text{白天}}$ 的平均值，单位为 min^{-1} 。

D.5 计算水生植物的初级生产力GPP

根据式 (D.12) 及白天水生植物的呼吸作用，利用步骤1监测的溶解氧浓度 C ，计算水生植物的初级生产力 GPP ：

$$dC / dt = GPP - ER \pm E \dots\dots\dots(D.12)$$

$$E = K(O_2)_{\text{白天}} \times D \dots\dots\dots(D.13)$$

$$GPP = ER_{\text{白天}} \pm E + \Delta C \dots\dots\dots(D.14)$$

式中：

dC / dt —水体中溶解对时间的变化量；

C —水体中溶解氧的浓度，单位为 mg L^{-1} ；

t —时间，单位为 min ；

GPP —生态系统中水生植物初级生产力，单位为 mg L^{-1} 当量氧气；

ER —第*n*时间点的水温，单位为 °C；

E —大气复氧；

$K(O_2)_{\text{白天}}$ —复氧系数，单位为 min^{-1} ；

$ER_{\text{白天}}$ —白天水生植物的呼吸作用，单位为 mg L^{-1} 当量氧气；

ΔC —监测点上、下游水体的溶解氧差值，单位为 mg L^{-1} 。

D.6 计算水生植物对岩溶碳汇的固定量

一天内水生植物对岩溶碳汇的固定量，即得所述实时在线监测水生植物岩溶碳汇效应：

$$NPP = GPP - ER_{\text{总}} \dots\dots\dots (D.15)$$

式中：

NPP —水生植物对岩溶碳汇的固定量，单位为 mg L^{-1} 当量氧气；

GPP —生态系统中水生植物初级生产力，单位为 mg L^{-1} 当量氧气；

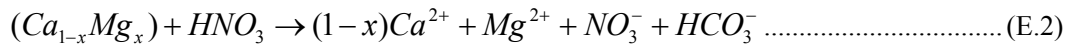
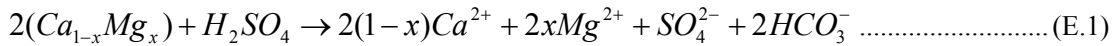
$ER_{\text{总}}$ —水生植物总呼吸作用，单位为 mg L^{-1} 当量氧气；

附录 E

(资料性)

碳酸溶蚀碳酸盐岩产生的溶解无机碳

自然界除了碳酸外,硫化物氧化形成的硫酸和农业活动施肥形成的硝酸对碳酸盐的溶解也能增加水中的DIC浓度,其作用类似于深部CO₂的影响,因此也应在碳汇计算中加以扣除。如果流域内硫酸和硝酸参与碳酸盐岩的溶蚀,公式分别为:



假设有 k_1 mmol/l由碳酸, k_2 mmol/l由硫酸和 k_3 mmol/l由硝酸溶蚀碳酸盐岩产生的(Ca²⁺+Mg²⁺),由碳酸溶蚀碳酸盐岩产生的(Ca²⁺+Mg²⁺)和HCO₃⁻的浓度可以通过下式计算:

$$k_1 = [Ca^{2+} + Mg^{2+}]_{H_2CO_3} = [HCO_3^-]_{Groundwater} - [Ca^{2+} + Mg^{2+}]_{Groundwater} \dots\dots\dots (E.3)$$

$$[HCO_3^-]_{H_2CO_3} = 2k_1$$

式中:

$[HCO_3^-]_{Groundwater}$ —地下水中总的无机碳摩尔浓度,单位为 mmol L⁻¹;

$[Ca^{2+}+Mg^{2+}]_{Groundwater}$ —地下水中总的钙镁摩尔浓度,单位为 mmol L⁻¹;

$[HCO_3^-]_{H_2CO_3}$ —碳酸溶蚀碳酸盐岩产生的溶解无机碳的摩尔浓度,单位为 mmol L⁻¹。

附录 F

(资料性)

水-气界面 CO₂ 交换通量估算方法F.1 CO₂ 交换通量

根据空气和水体内气体成分的浓度梯度并运用Fick定律，通过以下公式来估算通量：

$$Flux = K(C_{water} - C_{air}) \dots\dots\dots(F.1)$$

$$C_{water} = K_0 \times pCO_2 \dots\dots\dots(F.2)$$

$$C_{air} = \frac{pCO_{2(air)} \times 101.325}{8.3144 \times (273.13 + T)} \dots\dots\dots(F.3)$$

$$\ln K_0 = -58.0931 + 90.5069 \times (100 / T_k) + 22.294(T_k / 100) \dots\dots\dots(F.4)$$

式中：

Flux—CO₂交换通量，单位为 mg m⁻² h⁻¹；

C_{water}—CO₂在水体中的浓度，单位为 mmol L⁻¹；

C_{air}—空气中CO₂浓度，单位为 mmol L⁻¹；

K—CO₂交换系数，单位为 cm h⁻¹；

K₀—亨利常数，即气体溶解度，单位为 mol L⁻¹ atm⁻¹；

T—水体温度，单位为 °C；

T_k—水体绝对温度，单位为 K。

二氧化碳分压按附录C.3计算。

F.2 CO₂ 交换系数K的计算

$$K = K_{600} (S_c / 600)^{-x} \dots\dots\dots(F.5)$$

式中：

K₆₀₀—六氟化硫 (SF₆) 气体的交换系数，单位为 cm h⁻¹；

S_c—*t*°C下CO₂的Schmidt常数；

x—施密特数 (Schmidt)，当风速小于3m·s⁻¹时*x*为0.66，当风速大于3 m·s⁻¹时*x*为0.5。

其中，*S_c*可通过下式计算：

$$S_c = 1911.1 - 118.11t + 3.4527t^2 - 0.04132t^3 \dots\dots\dots(F.6)$$

$$K_{600} = 4.46 + 7.11 \times \bar{u}_{10} \dots\dots\dots(F.7)$$

$$K_{600} = 2.07 + (0.215 \times \bar{u}_{10})^{1.7} \dots\dots\dots (F.8)$$

$$K_{600} = 0.45 \times \bar{u}_{10}^{1.7} \dots\dots\dots (F.9)$$

$$K_{600} = 1.68 + (0.228 \times \bar{u}_{10}^{2.2}) \dots\dots\dots (F.10)$$

$$\bar{u}_{10} = 1.22 \times \bar{u}_1 \dots\dots\dots (F.11)$$

式中：

S_c — t °C下CO₂的Schmidt常数；

K_0 —亨利系数，即气体溶解度，单位为 mol L⁻¹ atm⁻¹；

T_k —水体绝对温度，单位为 K；

T —水体温度，单位为 °C；

\bar{u}_{10} —水面上方10m风速，单位为 m s⁻¹；

\bar{u}_1 —现场监测所得的水体上方风速，单位为 m s⁻¹。

公式F.7适用于河流，F.8、F.9、F.10适用于湖泊和水库。

附 录 G
(资料性)
流域内源有机碳

G.1 流域内源有机碳

假设水体有机质仅为流域土壤侵蚀和水生藻类两种物源的混合,则颗粒有机质中来自土壤侵蚀的成分的计算可表述为:

$$A_{sample} = B_{soil} \times A_{soil} + (1 - B_{soil}) \times A_{alga} \dots\dots\dots (G.1)$$

式中:

A_{sample} —水体TOC / TN比;

B_{soil} —土壤侵蚀物源的贡献率;

A_{soil} —流域内土壤TOC / TN比的平均值;

A_{alga} —流域内藻类样品TOC / TN的平均值。

$$[TOC]_n = [TOC]_z \times (1 - B_{soil}) \dots\dots\dots (G.2)$$

式中:

$[TOC]_n$ —水体中内源有机碳含量,单位为 mmol L^{-1} ;

$[TOC]_z$ —水体中总有机碳含量,单位为 mmol L^{-1} ;

附 录 H
(资料性)
沉积物碳沉积速率及来源计算

H.1 采样

H.1.1 采样容器的材质应不与沉积物发生反应。材料在化学和生物方面应具有惰性，使样品组分与容器之间的反应减到最低程度。

H.1.2 柱状样采样一般运用重力采样器采取，条件允许时也可通过水下挖样方式采取。较深层的柱状沉积物可通过打钻获取。所采集的柱状沉积物年代宜达到1950年以前的时间长度。

H.2 样品处理

H.2.1 柱状沉积物宜在野外分割，如条件不允许，在运输过程中也要防止受到扰动导致样品混合。样品处理时，可用虹吸法去除沉积柱上层残水，然后对每根沉积柱用1-2cm分样分割（具体结合实际沉积速率），装入密封袋，做好编号等记录，低温保存，并尽快运回实验室进一步处理。

H.2.2 从野外取回并登记编号的样品都需要经历干燥的过程。采集到样品后，首先挑出动植物残骸、石头颗粒、砖块等，以除去非底质样的组成部分，并适当敲碎，充分混合，并进行风干，如有条件也可冷干处理。然后根据所要测试的项目进一步磨细、混匀和分样。

H.3 测试指标及方法

表 H.1 测试指标及方法

分析项目	分析方法	规范性引用
有机碳	CHN 元素仪分析法（热导法）	ISO-10694
	重铬酸钾氧化分光光度法	HJ615-2011
有机质稳定碳同位素	同位素质谱法	GB/T 18340.2-2010
总氮	CHN 元素仪分析法（热导法）	ISO 13878-1998
	凯氏法	《湖泊富营养化调查规范（第二版）》
²¹⁰ Pb, ¹³⁷ Cs	伽马谱仪	GB11743-89

H.4 定年

H.4.1 CIC模式

CIC模式是基于²¹⁰Pb输入通量与沉积物堆积速率恒定条件下的年代计算方法。CIC模型公式为：

$$C_h = C_{(h=0)} e^{-\lambda t} \dots\dots\dots(H.1)$$

式中:

t — h 深度的年份, 单位为a;

λ — ^{210}Pb 的衰减常数(0.03114);

A_h — h 质量深度的 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 活度, 单位为 Bq kg^{-1} ;

$C_{(h=0)}$ — h 为0处的 ^{210}Pb 比活度, 单位为 Bq kg^{-1} ;

C_h —质量深度 h 处的 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 比活度, 单位为 Bq kg^{-1} 。

H. 4. 2 CRS模式

CRS模式是基于 ^{210}Pb 输入(沉积)通量不变的情况下, 沉积速率可能发生改变的情况。CRS模式计算公式为:

$$T_m = T - \lambda^{-1} \ln(A_0 A_m^{-1}) \dots\dots\dots (\text{H.2})$$

$$A_0 = \sum_{x=1}^n C_x \rho_x \dots\dots\dots (\text{H.3})$$

$$A_m = \sum_{x=m}^n C_x \rho_x \dots\dots\dots (\text{H.4})$$

式中:

T_m — m 质量深度对应的年代, 单位为a;

T_0 —采样年份, 单位为a;

λ — ^{210}Pb 的衰减常数(0.03114);

A_0 —整个沉积岩心 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 累积量, 单位为 Bq cm^{-2} ;

A_m — m 质量深度以下 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 累积量, 单位为 Bq cm^{-2} ;

C_x — x 质量深度的 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 比活度, 单位为 Bq kg^{-1} ;

ρ_x — x 质量深度的样品容重, 单位为 g cm^{-2} 。

H. 4. 3 配合 ^{137}Cs 时标的 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 活度定年

岩心表层到 ^{137}Cs 时标(1963年)之间所对应的各层位的年代计算公式为:

$$T_m = T_n + \lambda^{-1} \ln[1 + (A_0 - A_m)P^{-1}\lambda] \dots\dots\dots (\text{H.5})$$

$$P = [-\lambda(A_0 - A_m)] / [1 - e^{-\lambda(T_0 - 1963)}] \dots\dots\dots (\text{H.6})$$

$$A_m = \sum_{x=w}^n C_x \rho_x \dots\dots\dots (\text{H.7})$$

式中:

A_w —为1963年所对应的 w 层位以下 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 累积量, 单位为 Bq cm^{-2} ;

1963年以下各层位样品所对应的年份的计算公式为: :

$$T_m = 1963 - \lambda^{-1} \ln(A_w A_m^{-1}) \dots\dots\dots (\text{H.8})$$

$$r = h / (T_0 - T_m) \dots\dots\dots (\text{H.9})$$

式中:

r —到 h 深度的沉积柱的沉积速率，单位为 cm a^{-1} 。

H.5 内源有机碳

采用二元模式获得沉积物内源有机碳相对输入量。即：

$$C_u = \frac{R_u \times (TOC - R_l \times TN)}{R_u - R_l} \dots\dots\dots(H.10)$$

式中：

- C_u —某一层沉积物样品中来自内源的TOC含量，单位为 mg kg^{-1} ；
- R_u —某一层沉积物样品中来自内源的TN含量，单位为 mg kg^{-1} ；
- TOC —某一层沉积物样品中总有机碳的含量，单位为 mg kg^{-1} ；
- TN —某一层沉积物样品中总氮的含量，单位为 mg kg^{-1} ；
- R_l —某一层沉积物样品中来自陆源的碳氮比；
- R_u —某一层沉积物样品中来自内源的碳氮比；

其中，TOC和TN为某一层位沉积物样品中TOC和TN实测含量。一般的，内源有机质C/N处于3-8之间，陆源有机质为大于20以上，因而 $R_l \geq 20$ ， $R_u \leq 8$ ，故 R_l 和 R_u 的值可取零级近似，根据沉积物实际测试情况取值。即对于 R_l ，若实测碳氮比范围最大值处于8-20之间，则取值 $R_l=20$ ，若范围最大值大于20，则实际最大值作为 R_l ；对于 R_u ，当实测碳氮比范围最小值处于8-20之间，则取值 $R_u=8$ ，若范围最小值小于8，则实际最小值作为 R_u 。

H.6 流域内源有机质沉积通量

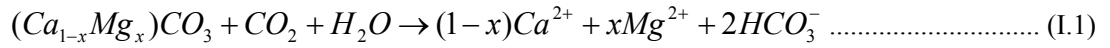
$$F_{soc} = \frac{\overline{C_u}}{S_c \times a} \times m \times S_l \times \frac{44}{12} \times 10 \dots\dots\dots(H.11)$$

式中：

- F_{soc} —湖泊或水库内源有机碳沉积通量，单位为 $\text{t CO}_2 \text{ a}^{-1}$ ；
- $\overline{C_u}$ —沉积柱各层位内源有机碳的平均值，单位为 mg kg^{-1} ；
- S_c —沉积柱的表面积，单位为 cm^2 ；
- S_l —湖泊或水库面积，单位为 km^2 ；
- m —沉积柱质量，单位为 kg ；
- 10 —转换系数。

附 录 I
(资料性)
流域无机碳输出量

根据碳酸盐岩溶解的方程式为:



岩溶作用消耗的大气/土壤CO₂生成的无机碳输出量可表示如下:

$$C_m = 0.031536 \times Q / S \times \frac{[HCO_3^-] \times 44}{61} \dots\dots\dots (I.2)$$

$$\text{或 } C_m = 0.031536 \times M \times \frac{[HCO_3^-] \times 44}{61} \dots\dots\dots (I.3)$$

式中:

M—地下水径流模数, 单位为 L S⁻¹ km⁻²;

Q—岩溶地下水径流量, 单位为 L S⁻¹;

S—流域面积, 单位为 km²;

[HCO₃⁻]*]*—水体HCO₃⁻含量, 单位为 mg L⁻¹;

C_m—流域无机碳输出量, 单位为 t CO₂ km⁻² a⁻¹;

0.031536—单位转换系数。

附录 J

(资料性)

流域岩溶碳汇强度及通量

J.1 流域岩溶碳汇强度-水化学径流法

由于存在水生生物光合作用对DIC的利用,水体中的DIC有相当大的比例转换为有机质,形成所谓的内源有机碳TOC。因此,为正确反映岩石风化碳汇能力,有必要将这部分内源有机碳也考虑在内,现代基于水-岩-气-生相互作用的风化碳汇模型,岩溶碳汇强度公式为:

$$C = C_{DIC} + C_{TOC} + C_{SOC} = Q \times [HCO_3^-]_{H_2CO_3} \times 44 / A + Q \times [TOC]_n \times 44 / A + F_{SOC} / S_l \dots\dots\dots (J.1)$$

式中:

C_{DIC} —流域无机碳汇通量,单位为 $t CO_2 km^{-2} a^{-1}$;

C_{TOC} —为流域内源有机碳汇通量,单位为 $t CO_2 km^{-2} a^{-1}$;

C_{SOC} —为流域内源有机质沉积通量,单位为 $t CO_2 km^{-2} a^{-1}$;

$[TOC]_n$ —流域内源有机碳摩尔浓度,单位为 $mmol L^{-1}$;

A —流域面积,单位为 km^2 ;

Q —流域径流排泄量,单位为 $L S^{-1}$;

$[HCO_3^-]_{H_2CO_3}$ —碳酸溶蚀碳酸盐岩产生的溶解无机碳的摩尔浓度,单位为 $mmol L^{-1}$;

S_l —流域内湖泊/水库的面积,单位为 km^2 ;

F_{soc} —湖泊或水库内源有机碳沉积通量,单位为 $t CO_2 a^{-1}$;

44— CO_2 的原子量;

J.2 流域岩溶碳汇通量

流域碳汇通量采用下式计算:

$$F = F_{DIC} + F_{TOC} + F_{SOC} = Q \times [HCO_3^-]_{H_2CO_3} \times 44 + Q \times [TOC]_n \times 44 + F_{SOC} \dots\dots\dots (J.2)$$

式中:

F_{DIC} —流域无机碳汇通量,单位为 $t CO_2 km^{-2} a^{-1}$;

F_{TOC} —为流域内源有机碳汇通量,单位为 $t CO_2 km^{-2} a^{-1}$;

其他与公式J.1同。

附 录 K
(资料性)
成果报告编写提纲

- K.1 前言：任务来源、目的的任务和意义，任务书编号、项目编码、工作起止时间。工作区以往研究程度。调查工作过程以及完成的工作量，调查工作质量评述，本次调查工作的主要成果和进展。
- K.2 调查区地理位置、社会经济发展及与碳循环相关的人类活动概况。
- K.3 调查区气象水文、地形地貌等。
- K.4 岩溶碳循环形成的地质背景条件：在分析地层岩性、地质构造、表层岩溶带与洞穴发育的基础上，进行岩溶发育强度等级划分；计算碳酸盐岩溶蚀速率，对于重点调查区要求进行碳酸盐岩溶蚀速度分区。
- K.5 岩溶碳循环形成的生态环境条件，包括土地利用方式、植被类型、土壤类型与特征，以及石漠化、水土流失、洪涝、酸雨区分布等，分析岩溶生态环境加速碳酸盐岩溶蚀，增加碳汇的过程，尤其重视人类活动驱动或影响岩溶碳汇（源）过程，量化岩溶碳汇形成的人为作用效应。
- K.6 岩溶碳循环形成的水文地质条件，确定地下水流域边界，地下水含水介质、补给、径流、排泄条件，建立流域水文地质概念模型，计算地下水径流模数；外源水的形成及作用。
- K.7 水化学及同位素特征。根据流域的水化学及同位素特征，确定流域的岩石风化化学反应方程，通过离子的化学计量及同位素分析，进行岩溶风化的物源鉴定，量化流域各种岩石在风化过程中消耗大气/CO₂的份额。
- K.8 水生生物的固碳效应，分析岩溶成因碳汇迁移与水生生物之间的关系，估算水生植物利用岩溶成因碳的能力和效率，研究不同水生植物类型(或种类)对岩溶碳汇稳定性的作用。
- K.9 岩溶地质碳汇量计算，根据形成碳汇的条件和影响因子，针对不同的调查精度和尺度，建立碳汇计算模型，进行岩溶地质作用消耗的CO₂汇估算。
- K.10 结论和建议：调查工作成果，岩溶流域固碳增汇的建议，本次工作存在的问题，下一步工作建议。

参 考 文 献

- [1] GB12329-90 岩溶地质术语
 - [2] GB/T 14175-93 水文地质术语
 - [3] DZ/T0282-2015 水文地质调查规范（1：5万）
 - [4] DD 2004-02 区域环境地质调查总则（试行）
 - [5] DD 2004-01 区域水文地质调查技术要求（1:25万）
 - [6] GB 15618-1995 中华人民共和国国家标准土壤环境质量标准
 - [7] HJ/T166-2004 土壤环境监测技术规范
 - [8] LY/T 1687-2007 热带森林生态系统定位观测指标体系
 - [9] LY/T 1237-1999 森林土壤有机质的测定及碳氮比的计算
 - [10] DB43/T 432-2009 淡水生物调查技术规范
 - [11] DB11/T 953-2014 林业碳汇计量监测技术规程
-