流溪河水库流域碳氮营养盐浓度的时空变化特征及其影响因素

牛香豫，唐国平，顾 慧，陈 桃，陈晓桦

（中山大学地理科学与规划学院，广州 510275）

摘要：流溪河水库流域是亚热带典型的山地河源区，研究此流域的碳氮营养盐浓度时空变化特征及其影响因素对揭示亚热带流域生物地球化学循环与保障水资源供给具有重要意义。基于地形、气象、土地利用、土壤和实地采样获得的水质数据，采用相关分析及 Elastic Net 回归分析法，探讨了流溪河水库流域溪流碳氮营养盐浓度的时空变化特征及其影响因素。结果表明：(1)从时间上看，枯水期各采样点溪流碳氮营养盐浓度总体变化不大，但空间差异明显，其中 NO_3^- 与 NH_4^+ 浓度具有强相关性。(2)流域坡度大小是引起不同溪流碳氮营养盐浓度存在差异的重要因子，且三级以上坡度对碳氮营养盐浓度变化产生显著的正面影响。(3)流域平均相对湿度也显著影响溪流碳氮营养盐的浓度。流域相对湿度越大，溪流的溶解有机碳浓度相对较高，但氮营养物浓度相对较低；同 DOC 相比，NO_3^- 和 NH_4^+ 对气象条件变化敏感度较低。(4)土地利用如建成区面积占比等人类活动显著影响碳氮营养盐的浓度，表现为建成区面积占比与 DOC 浓度呈负相关关系。此外，森林覆盖度增大会提高溪流 DOC 和 NO_3^- 的浓度，但对 NH_4^+ 浓度的影响不显著。(5)土壤类型也影响流域碳氮营养盐的浓度，简育低活性强酸土对 NO_3^- 浓度产生正面影响，人为堆积土对 NH_4^+ 浓度产生正面影响。研究结果可为流域水资源保护和了解碳氮营养物浓度的变化及影响因素提供有益信息。

关键词：碳氮营养物；弹性网络回归；人类活动；土地利用；生物地球化学循环

中图分类号：X143；X524 **文献标识码**：A **文章编号**：1009-2242(2022)02-0352-09

DOI：10.13870/j.cnki.stbcxb.2022.02.045

Spatial-temporal Variation of Carbon and Nitrogen Nutrients Concentrations and Its Influencing Factors in Liuxi River Reservoir Basin

NIU Xiangyu, TANG Guoping, GU Hui, CHEN Tao, CHEN Xiaohua

(*School of Geography and Planning, Sun Yat-sen University, Guangzhou* 510275)

Abstract: The Liuxi River reservoir basin is a typical subtropical mountain basin, and it is of great significance to study the changing characteristics of carbon and nitrogen nutrients concentrations in this basin and its influencing factors to reveal the biogeochemical cycle of subtropical basin. Based on the field sampling of water quality, landscape topography, meteorology, land use as well as soil data, this paper explored the spatial-temporal changing characteristics and the influencing factors of the carbon and nitrogen nutrients concentrations in streams located in the Liuxi River Reservoir basin, using correlation and Elastic Net regression analysis. The results showed that: (1) The temporal trend of carbon and nitrogen nutrients concentrations in streams was relatively stable during dry period, whereas the spatial variation was obvious. (2) The slope of sub-basin was an important environmental factor that caused the changes of carbon and nitrogen nutrients concentrations in different streams, and the slope beyond 6° had a significant positive effect on the change of carbon and nitrogen nutrients concentrations. (3) The average relative humidity of the basin also significantly affected the concentrations of carbon and nitrogen nutrients in streams. The greater the relative humidity of the basin was, the higher the concentration of carbon nutrients in the streams would be, but the concentration of nitrogen nutrients would be relatively low. Compared witth the DOC, the NH_4^+ and NO_3^- concentrations in streams were less sensitive to the weather conditions. (4) The land use, such as the proportion of the

收稿日期：2021-08-27

资助项目：国家自然科学基金项目(42171025)

第一作者：牛香豫(1997—)，女，在读硕士研究生，主要从事流域水循环与水环境研究。E-mail：niuxy8@mail2.sysu.edu.cn

通信作者：唐国平(1969—)，男，教授，博士生导师，主要从事流域水循环与水环境研究。E-mail：tanggp3@mail.sysu.edu.cn

built-up area and other human activities, significantly affected the concentrations of carbon and nitrogen nutrients, as shown by a negative correlation between the built-up area and the DOC concentration. The increased forest cover could enhance the DOC and NO_3^- concentrations in streams, but had no significant effect on the NH_4^+ concentration. (5) The different soil types also affected the concentrations of carbon and nitrogen nutrients in watersheds, the haplic acrisols had a positive effect on the NO_3^- concentration, and the aric anthrosols had a positive effect on the concentration of NH_4^+. Overall, our results provide some useful scientific information for the protection of water resources and understanding the changes and influencing factors of carbon and nitrogen nutrients concentrations in the similar watersheds.

Keywords: carbon and nitrogen nutrients; Elastic Net regression; human activities; land use; biogeochemical cycles

碳、氮作为地球物质循环的重要元素,对维持全球生态系统稳定起着十分重要的作用。在水生生态系统中,溶解有机物是维持自然界碳氮平衡的重要组成部分[1]。在流域生态系统中,溶解有机物如溶解有机碳(dissolved organic carbon, DOC)、溶解有机氮(dissolved organic nitrogen, DON)等营养盐的来源包括自然和人为输入源。自然输入源涉及因土壤淋溶、地形坡度[2]、降水[3]、流量[4]等变化引起的营养盐流失;人为输入源包括因土地利用变化[5]、农业[6]等人类活动造成的营养盐流失。在不同环境条件下发育的河流,其碳氮营养盐的来源及浓度变化也具有很强的时空差异性[7]。此外,资源利用和管理政策变化对河流中的碳氮营养盐浓度产生影响[8]。水体水质的变化改变水生生物原有的生境[9]。鉴于水生生物对生境变化的响应与碳氮营养盐浓度变化呈现非同步性,水体碳氮营养物浓度变化对水生生物的生命活动也产生一定影响[10]。

目前,针对流溪河水库流域的研究多集中于水生生物群落时空动态变化和水库库区底泥沉积物。温展明等[11]对流溪河水库流域敞水区定期采样,通过数理统计分析发现,枯水期因环境要素尤其是水文和水质要素的波动变化使得轮虫群落变异较大;王艳杰等[12]对流溪河水库的沉积环境展开研究发现,库区不同采样点分布的沉积物粒径大小及沉积速率具有空间异质性。然而,从流域尺度上探讨流域溪流碳氮营养盐浓度的变化及其影响因素的研究较少[13]。流溪河水库流域不仅是典型的亚热带山地流域,也是广州市重要的水源地,研究其水质变化对揭示亚热带生物地球化学循环规律和保障城市用水安全具有重要的意义。

本文选取流溪河水库流域作为研究区,通过野外采样和实验室分析,结合地形、土地覆被与利用以及人类社会活动数据,分析流溪河水库流域碳氮营养盐浓度的时空变化特征及其影响因素,为把握流溪河水库流域水质变化和了解亚热带地区生物地球化学循环特征及影响因素提供科学信息。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

流溪河水库流域(113°44′—114°04′E,23°40′—23°60′N)位于广东省广州市从化区东北部,流域面积约 539 km^2,海拔 106～1 182 m。流溪河发源于从化区吕田镇桂峰山,流经广州市的从化区、花都区和白云区,最终在南岗口与白泥河汇流注入珠江。流溪河水库流域地形呈现东北高、西南低,气候属于南亚热带季风气候,多年平均降水量 1 823.6 mm,降水时空分布不均,丰水期为 4—9 月,其降水量占全年降水量的 81.3%;空间上,降雨分布呈现西南多、东北少[14]。流域植被属南亚热带常绿阔叶林,群落物种丰富,森林覆盖度达 80%以上。

1.2　数据来源与处理

研究所用水质数据来自于 2019 年 9 月至 2020 年 1 月对流溪河水库流域 5 个采样点的水样试验分析结果。采样期内,野外采样基本保持 1 周 1 次,试验分析指标包括水样的 DOC 浓度、硝酸根离子(NO_3^-)和铵根离子(NH_4^+)浓度。5 个采样点使用河流或者附近村落命名,分别为吕田河、黄水溪、哪吒岭、安山河和东星河,其中吕田河、黄水溪、哪吒岭 3 个子流域位于流溪河水库流域上游,安山河位于流溪河水库流域中游,东星河位于流溪河水库流域下游。试验分析前,先用 0.45 μm 滤膜对采集的水样进行过滤,后使用纯水洗净且烘干的聚乙烯瓶承装,放入保温箱中低温保存,用于水样理化分析。水样 NH_4^+、NO_3^- 离子的浓度通过离子色谱仪测定,水样 DOC 的浓度通过元素分析仪测得。本研究所用的其他数据包括土地利用/覆被、地形、水系、气象和土壤数据。土地利用/覆被数据来自于国家基础地理信息中心全球地表覆盖数据产品服务网站(http://www.globeland30.org/,DOI:10.11769),年份为 2020 年,分辨率为 30 m。根据土地覆被类型及研究区的实际情况,将流域内土地覆被分为建成区、森林、水体、灌木地、耕地和草地。

地形数据来源于 ASTER 全球数字地形高程数据库(https://lpdaac.usgs.gov),分辨率为 30 m。根据《中华人民共和国土地管理行业标准》第三次全国国土调查技术规程[15],将研究流域的坡度划分为 5 个等级,分别为≤2°,2°～6°,6°～15°,15°～25°和>25°。基于 DEM 高程数据和流域出口水文站位置,运用 ArcGIS 的水文分析工具获取各采样点的子流域和河网数据。气象数据从国家气象科学数据中心获得(http://data.cma.cn),根据采样点的地理位置最终选取从佛冈站点获取气象数据,所获取的降雨量时段为 2019 年 9 月 1 日至 2020 年 1 月 31 日。相关性分析中用到的气象数据为采样日尺度气象数据,指标有平均温度、日照时间、平均相对湿度和极大风速。土壤数据来自联合国粮农组织(FAO)、维也纳国际应用系统研究所(IIASA)、世界土壤信息(ISRIC)、中国科学院南京土壤研究所(ISSCAS)和欧盟委员会联合研究中心(JRC)合作的世界土壤数据库(Harmonized World Soil Database version 1.2, HWSD)(http://webarchive.iiasa.ac.at/)。

1.3 研究方法

基于所获得的气象、地形、土地利用、土壤、水质等数据,采用相关和弹性网络(Elastic Net)回归分析法探讨研究区溪流碳氮营养物浓度变化与各环境变量之间的关联。

1.3.1 相关性分析 Spearman 相关系数计算公式[16]为:

$$\rho_{x,y}=\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\overline{x})(y_i-\overline{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\overline{x})^2}\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(y_i-\overline{y})^2}} \quad (1)$$

式中:ρ 为相关系数,表明自变量(x)与因变量(y)变化的方向。若 $\rho>0$,说明因变量随自变量增加而趋向于增加;若 $\rho<0$,说明因变量随自变量增加而趋向于减少;若 $\rho=0$,则说明自变量增加时因变量无任何趋向性。

1.3.2 弹性网络回归分析 弹性网络(Elastic Net)[17]是一种在最小二乘法基础上结合 L1 正则化(Lasso 回归)和 L2 正则化(岭回归),通过不断迭代选择最佳收缩参数得到少量参数的稀疏模型,其最终目的是最小化损失函数。弹性网络的损失函数计算为:

$$L_{\mathrm{enet}(\hat{\beta})}=\frac{\sum_{i=1}^{n}(y_i-x_i{}^{j}\hat{\beta})^2}{2n}+\lambda\left(\frac{1-\alpha}{2}\sum_{j=1}^{m}\hat{\beta_j}^{2}+a\sum_{j=1}^{m}|\hat{\beta}_j|\right) \quad (2)$$

式中:α 为介于 Lasso 回归($\alpha=1$)和岭回归($\alpha=0$)间的混合参数;λ 为收缩参数;n 为样本数目;m 为参数数目;$\hat{\beta}$为参数估计值。

相关性分析及 Elastic Net 回归分析均通过 R 统计语言完成。

2 结果与分析

2.1 DOC 浓度变化的时空特征

从时间上看,采样期为流溪河水库流域的枯水期,该时段内溪流中 DOC 的浓度绝大多数情况下变化比较平稳,个别月份 DOC 浓度变化较大(图 1a)。DOC 浓度值变化为 3.75～17.95 mg/L,且 2019 年 9—12 月 DOC 浓度波动范围较小,但 2020 年 1 月 DOC 浓度增加显著,其值明显高于 2019 年 9—12 月间的其他值。吕田河、安山河、黄水溪时间变化趋势相似,东星河 DOC 浓度的变化趋势滞后于吕田河、安山河、黄水溪 3 个采样点水体 DOC 的浓度,哪吒岭 DOC 浓度变化趋势较平缓。

空间上,通过 Kruskal-Wallis 检验发现,流域不同溪流的 DOC 浓度存在极显著差异($p<0.001$)(图 1b)。从 DOC 平均浓度来看,吕田河最大,为 7.08 mg/L;东星河次之,为 6.31 mg/L;安山河平均浓度略低于东星河,为 6.09 mg/L;黄水溪、哪吒岭浓度较低,分别为 4.98,4.33 mg/L。从 DOC 波动幅度来看,吕田河和安山河波动幅度较大,其次是东星河,黄水溪、哪吒岭波动幅度较小。

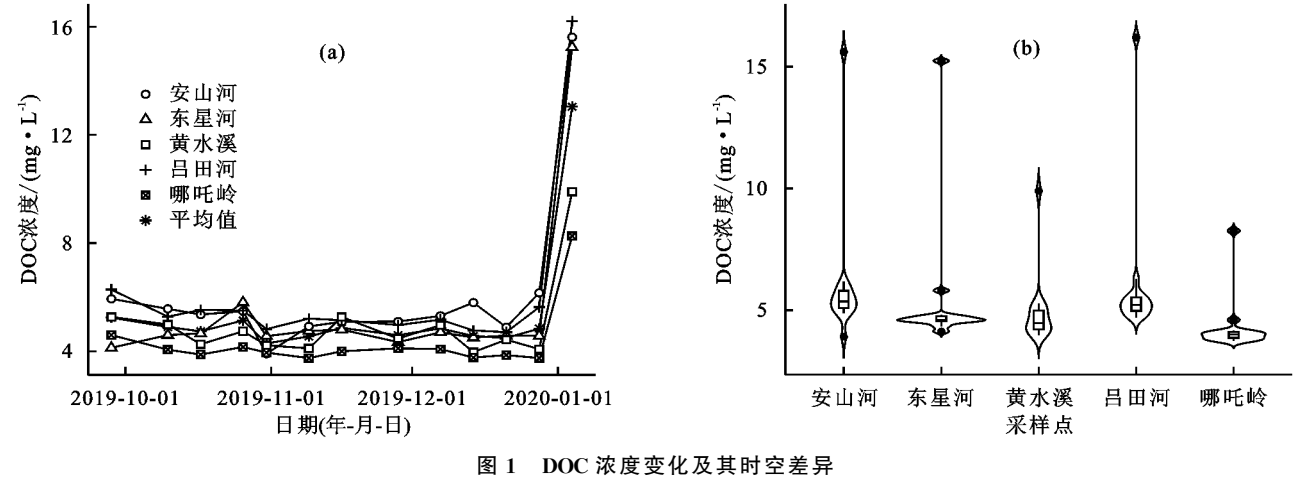


图 1 DOC 浓度变化及其时空差异

2.2　NO_3^- 浓度变化的时空特征

研究期间流溪河水库流域水体 NO_3^- 浓度变化为 0.62～6.02 mg/L,变幅较大,但变化趋势较平稳(图 2a)。2019 年 9 月末至 11 月中旬,河流 NO_3^- 浓度值分布较集中,多为 2～4 mg/L。2019 年 11 月末至 2020 年 1 月初,NO_3^- 浓度变幅增大且数值分布较分散,12 月中旬各采样点 NO_3^- 浓度差异最大(图 2a)。

从空间上看,基于 Kruskal-Wallis 检验发现,不同溪流 NO_3^- 浓度也存在极显著差异($p<0.001$)(图 2b)。吕田河 NO_3^- 浓度值较高,采样期间浓度多在 5 mg/L 上下浮动;东星河浓度稍低于吕田河,其值多为 4.0～4.5 mg/L;哪吒岭浓度在 2 mg/L 左右变化,变化幅度大于其他采样点,最大值达到 5.73 mg/L(图 2b)。

同上述 3 条溪流比较,安山河与黄水溪数值变化幅度较小。其中,安山河 NO_3^- 浓度略高于黄水溪。黄水溪数据分布集中,说明采样期间黄水溪 NO_3^- 浓度较稳定,浓度值约 1.5 mg/L。

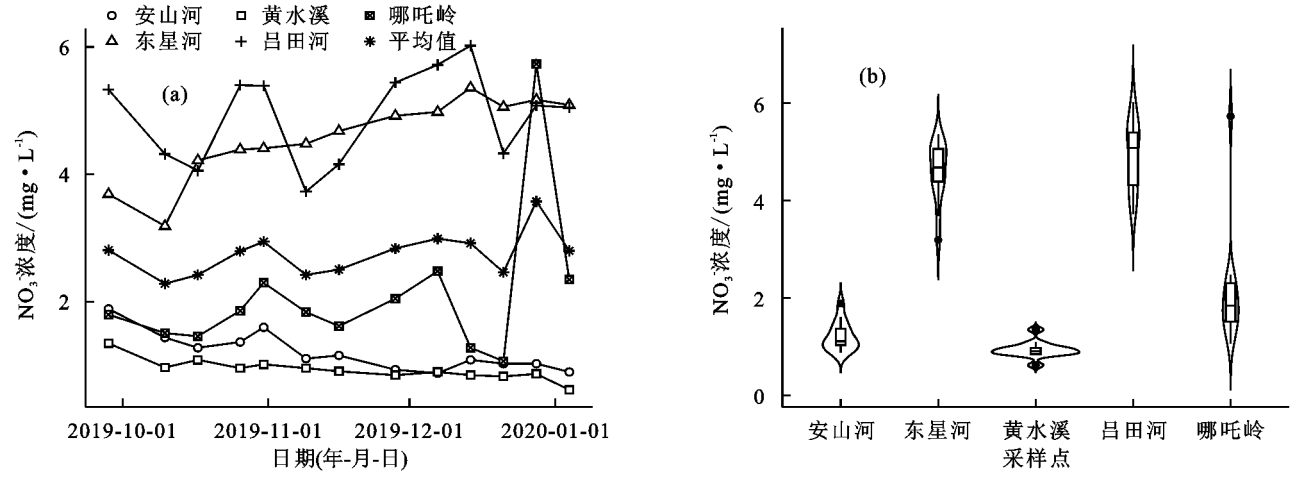


图 2　NO_3^- 浓度时间变化及其时空差异

2.3　NH_4^+ 浓度变化的时空特征

采样期内,从变化趋势看,除哪吒岭小溪流外,流溪河水库流域大多数溪流的 NH_4^+ 浓度较低,且总体变化较稳定(图 3a),采样点 NH_4^+ 浓度为 0.02～0.05 mg/L。

采样期间流溪河水库流域不同溪流 NH_4^+ 的浓度也存在差异(图 3b),总体分布格局呈现流域上游高,中下游偏低。哪吒岭 NH_4^+ 浓度在各采样点中最高,变化幅度最大。黄水溪和吕田河 NH_4^+ 浓度相近,低于哪吒岭,略高于安山河和东星河。除哪吒岭外,其他采样点所采得的水样中 NH_4^+ 浓度数值分布较集中,多为 0.02～0.05 mg/L,且浓度变化幅度小。相比较,哪吒岭采样点小溪流的 NH_4^+ 浓度在采样期内变化比较大(图 3)。

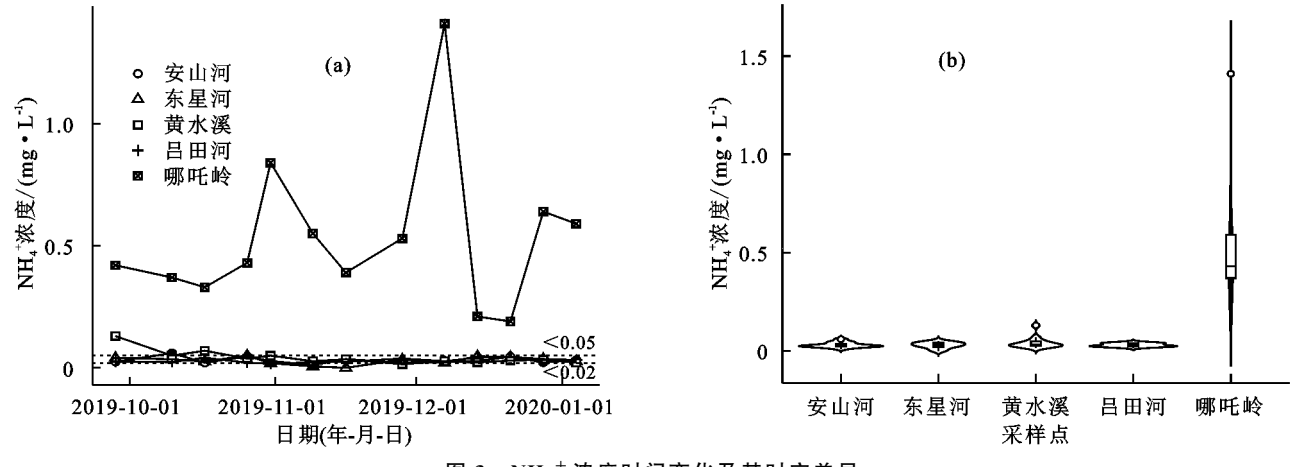


图 3　NH_4^+ 浓度时间变化及其时空差异

2.4　碳氮营养盐浓度与环境因子的关系

有研究[18-19]表明,降水量直接或间接对河流碳氮营养盐浓度产生显著影响。从采样期间流溪河水库流域降水量(图 4)来看,2019 年 9 月末至 2020 年 1 月初共发生 5 次降水事件,采样日期虽无降水,但从距降水事件发生的时间远近来看,越邻近降水事件,流域内碳氮营养盐浓度受到的影响越显著。受 2020 年 1 月 3 日降水事件影响,2020 年 1 月 4 日 DOC 浓度显著升高,NO_3^- 和 NH_4^+ 浓度总体下降。其余采样日期受降水事件影响较小,流域碳氮营养盐浓度总体处于动态平衡之中。

图 5a 为采样期间 DOC、NO_3^-、NH_4^+ 浓度变化与

气象条件的相关性分析结果。DOC 浓度与平均相对湿度呈显著正相关性($p<0.05$),相关系数为 0.27;NH_4^+ 与平均温度呈显著负相关($p<0.05$),相关系数为 −0.56;较 DOC 和 NH_4^+,NO_3^- 对气象条件敏感度低。此外,研究发现,NH_4^+ 和 NO_3^- 具有极显著的相关性($p<0.001$),相关系数为 0.72,这表明 NH_4^+ 浓度变化趋势与 NO_3^- 浓度变化趋势具有高度的一致性。

由图 5b 可知,各子流域溪流的碳氮营养盐浓度与坡度具有显著的相关性($p<0.05$)。其中,DOC 浓度与 1～3 级缓坡呈显著的负相关性($p<0.05$),相关系数分别为 −0.40,−0.28,−0.27;NO_3^- 浓度与 1,2 级坡呈显著负相关($p<0.05$),相关系数分别为 −0.32 和 −0.50。但 NH_4^+ 离子浓度与坡度的相关性随坡度等级变化而变化(图 5b)。NH_4^+ 浓度与 5 级坡呈现强负相关关系($p<0.001$),相关系数为 −0.8;而与 3,4 级坡呈现强正相关性($p<0.001$),相关系数分别为 0.80 和 0.81。

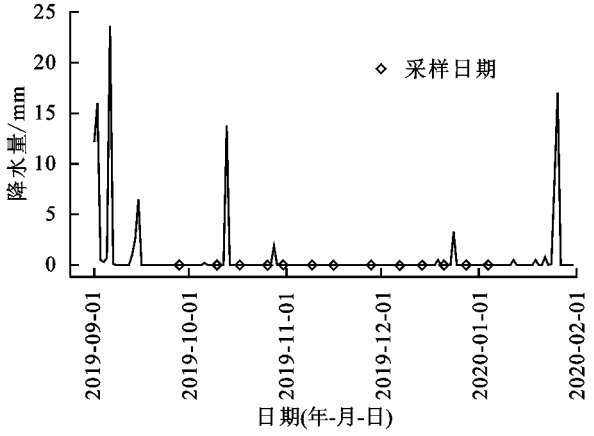


图 4 采样期间流溪河水库流域降水量分布

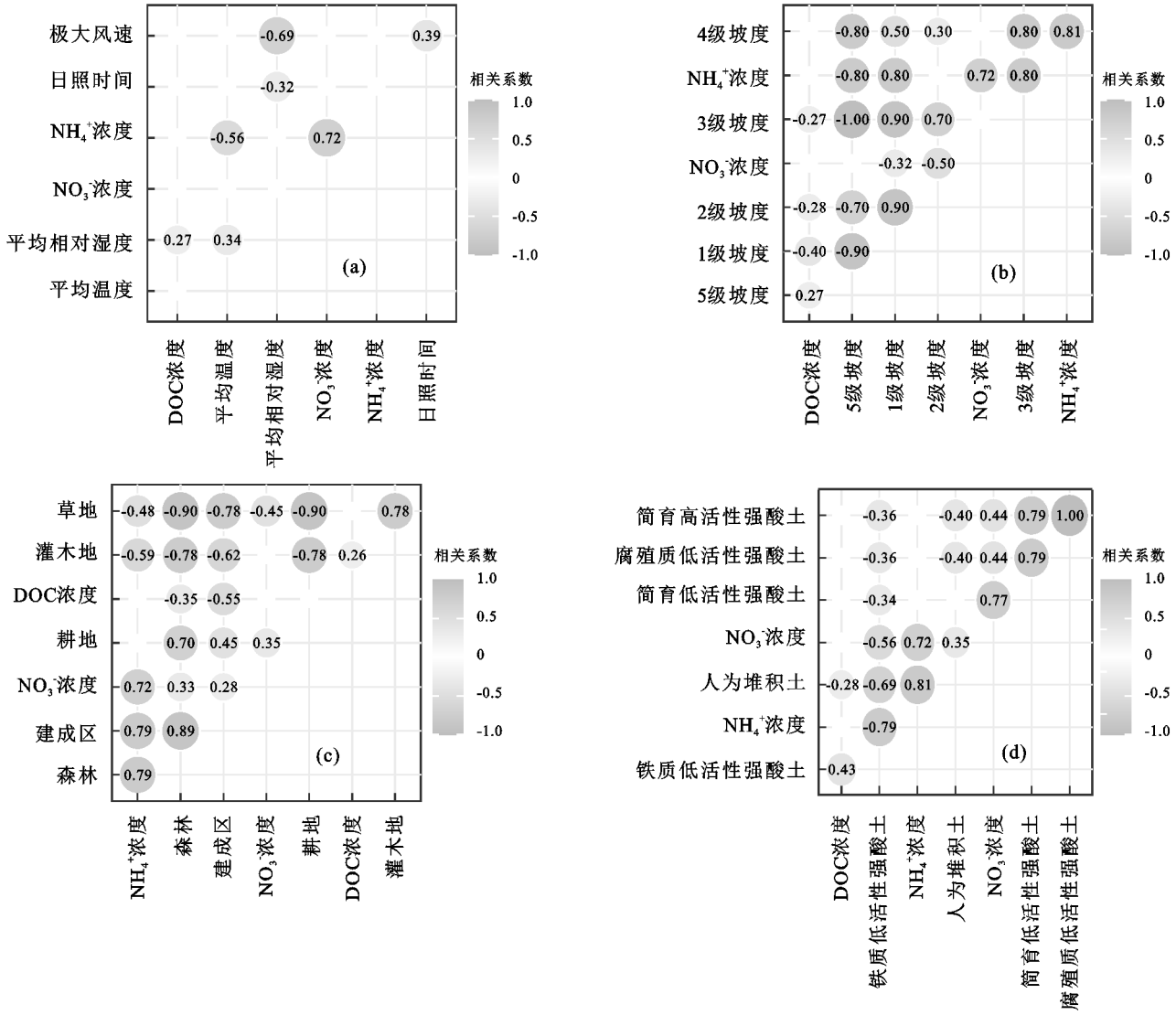


图 5 碳氮营养盐与环境因子相关性分析

土地利用类型对流域碳氮营养盐浓度变化也产生一定影响(图 5c)。溪流 DOC 浓度与森林、建成区的面积呈现极显著负相关关系($p<0.001$),相关系数分别为 −0.35 和 −0.55。相反,溪流 NO_3^- 浓度与森林和建成区呈显著的弱正相关关系($p<0.05$),相关系数分别为 0.33 和 0.28;此外,NO_3^- 还受到耕地的极显著影响($p<0.001$),相关系数为 0.35。NH_4^+ 浓度与建成区、森林则呈极显著正相关($p<0.001$),相关系数

均为 0.79;而与草地和灌木呈显著负相关($p<0.05$),相关系数分别为−0.48 和−0.59。

此外,流域碳氮营养盐浓度还受到土壤类型的影响。相关性分析结果(图 5d)表明,DOC 浓度与铁质低活性强酸土呈极显著正相关关系($p<0.001$),相关系数为 0.43;而与人为堆积土呈显著负相关关系($p<0.05$),相关系数为−0.28。相反,NO_3^- 浓度与铁质低活性强酸土呈现显著负相关关系($p<0.001$),相关系数为−0.56,而与其他土壤类型均呈正相关关系($p<0.01$),其中 NO_3^- 与简育低活性强酸土的相关系数为 0.77。相比较,溪流 NH_4^+ 浓度与铁质低活性强酸土呈现极显著负相关性($p<0.001$),而与人为堆积土呈现极显著正相关性($p<0.001$),相关系数分别为−0.79 和 0.81。

3　讨 论

3.1　影响 DOC 浓度变化的因素

采样期间流溪河水库流域中 DOC 浓度变化较稳定,变化幅度不大。2020 年 1 月 4 日 DOC 浓度明显高于 2019 年 9—12 月。根据气象资料发现,2020 年 1 月 3 日流域出现降雨事件,降水量为 0.1 mm,降水事件导致有机物质的淋洗作用增强,增加了溪流中 DOC 浓度。而采样期间其他降水事件因距相邻的采样日期较久,降水带来的影响被极小化,因此其他采样日期溪流中 DOC 浓度变化不大,所以 2020 年 1 月 4 日所观测到的 DOC 浓度明显高于其他日期。进一步的弹性网络分析佐证了各个环境要素对 DOC 浓度变化的综合影响大小(表 1)。本研究发现,溪流 DOC 浓度除受相对湿度影响外,还受到流域平均温度、日照时间和风速的影响。气象条件中极大风速对 DOC 浓度负面影响较大,日照时间和平均相对湿度对 DOC 浓度产生一定的正面影响,而平均温度对其产生的正面影响较小。流溪河水库流域的水源补给主要来自于降水,而采样期属于枯水期,流量对流域水化学性质影响十分有限[20],因此 DOC 浓度变化总体较稳定。极大风速促进水体表层与底层垂直对流,增强水体的自净能力,促进流域水体流动及蒸发,因此有助于缓解水体中营养物的富集;日照时间影响流域尺度生态系统的物质循环,适宜的环境温度能够促进植物的光合作用和微生物的分解作用,使 DOC 浓度变化与日照时间呈正相关关系。此外,陆地上的水体在风力作用下蒸发进入到大气中,一定程度上增加空气的相对湿度。近地面大气的相对湿度影响大气沉降过程,湿沉降能够通过水循环将地—气—水界面的碳氮营养盐联系起来,沉降至地表后通过径流进入到流域内,进而影响流域内的碳氮营养盐浓度,所以相对湿度对 DOC 浓度产生一定正面影响。

从 DOC 浓度的空间分布来看,弹性网络分析进一步佐证了 DOC 浓度主要受到建成区、森林及坡度的影响,其中建成区的影响最大(表 1)。从水库流域上游至下游,建成区面积占比逐渐降低,森林占比逐渐增加(表 2)。有研究[22]表明,流域中的溶解有机物受到土地利用的影响。哪吒岭、黄水溪、吕田河位于流域上游,周边建成区分布面积较广,安山河位于水库中游,建成区占比有所下降,而下游东星河则多分布森林,采样期间 DOC 浓度保持相对稳定,因此呈现出建成区占比与 DOC 浓度呈负相关关系。森林所占比重的增加一定程度上为水库流域 DOC 提供物质来源,说明流域 DOC 物质来源与人类活动及陆地生态系统中的生物地球化学循环有关。土壤中的有机质是河流中溶解有机质的重要来源,坡度的陡缓影响土壤被侵蚀状况,坡度越缓越有利于土壤中有机质的保持,从而降低河流中 DOC 的浓度。

表 1　DOC 浓度 Elastic Net 回归分析结果

显著自变量	线性回归拟合方程	λ 值	MAE	MSE	RMSE
建成区(Sb) 森林(Sf) 1 级坡度(Ss1) 平均温度(Sat) 日照时间(Ssh) 平均相对湿度(Srh) 极大风速(Sw)	DOC=5.33−0.62Sb−0.57Sw+0.39Ssh+0.25Srh−0.14Sat+0.13Sf−0.1Ss1	0.15	1.47	6.00	2.45

3.2　NO_3^- 浓度变化的影响因素

采样期间流溪河水库流域 NO_3^- 浓度变化总体较平稳,2019 年 9—11 月变幅较稳定,2019 年 12 月至 2020 年 1 月变幅增大。弹性网络分析进一步探究影响 NO_3^- 的显著环境变量,综合来看,尽管溪流 NO_3^- 的浓度受平均温度、日照时间、平均相对湿度和极大风速等气象要素影响(表 3),但影响较小。平均温度、平均相对湿度和极大风速对 NO_3^- 浓度产生负面影响,而日照时间对 NO_3^- 浓度产生正面影响。这主要是因为光照促进微生物的硝化作用,从而能够

为 NO_3^- 离子提供物质来源。温度越高,饱和水汽压差越大,越有利于水分蒸发,促进水循环,并加快水体的更新,以维持水体中营养物浓度的稳定。此外,有研究[23]表明,DOC 浓度与 NO_3^- 受到流域湿度的影响,且 DOC 与 NO_3^- 也可能存在相反的变化趋势,DOC 浓度的增加可能通过增强土壤或沉积物中的反硝化作用亦或是氮固定,从而抑制 NO_3^- 浓度的增加。这与 2020 年 1 月 4 日观测到的 DOC 与 NO_3^- 浓度变化较为相符。

表 2 流溪河水库流域土地利用面积占比情况

单位:%

土地利用	吕田河	黄水溪	哪吒岭	安山河	东星河	整个流域
草地	22.73	29.27	12.83	15.67	0	8.86
灌木地	0.15	0.13	0	0	0	0.11
耕地	0.32	0	2.49	4.41	15.98	6.52
森林	76.81	70.59	82.35	79.92	82.06	80.19
建成区	0	0	2.33	0	1.96	1.39
水体	0	0	0	0	0	2.92

表 3 NO_3^- 浓度 Elastic Net 回归分析结果

显著自变量	线性回归拟合方程	λ 值	MAE	MSE	RMSE
森林(Sf) 3 级坡度(Ss3) 4 级坡度(Ss4) 平均温度(Sat) 日照时间(Ssh) 平均相对湿度(Srh) 极大风速(Sw) 简育低活性强酸土(Sc)	$NO_3^-=2.69+2.28Sc+0.77Ss4+0.45Ss3+0.26Sf-0.18Sat-0.16Srh-0.11Sw+0.05Ssh$	0.004	0.42	0.23	0.48

受坡度、土地利用及土壤的显著影响($p<0.05$),流域溪流 NO_3^- 的浓度也表现出明显的空间异质性。从上游到下游,各采样点子流域 3 级以上坡度占比逐渐增加(表 4),子流域平均地势呈现变高的趋势。上中游多分布人为堆积土,下游则以自然土壤类型为主(表 5)。根据弹性网络回归分析结果,NO_3^- 浓度与 3 级坡度、4 级坡度、森林占比和简育低活性强酸土呈正相关关系,这与相关性分析结果基本一致,其中简育低活性强酸土的影响权重最大。有研究[24]表明,坡度的增加一定程度上增强流水对土壤的侵蚀作用,从而增加流域溶解性陆源 NO_3^- 向河流的输入。此外,河道旁的森林面积占比对流域营养物浓度产生影响[25]。从上游至下游森林面积占比增加,高坡度占比也逐渐增加,各采样点土壤粒径呈现由粗变细的趋势,生态系统中的林下凋落物为土壤提供有机质来源,使得土壤中的有机质更易被淋溶损失。从各采样点子流域来看,吕田河和东星河陡坡面积占比较高,且流域内分布有一定比例的简育低活性强酸土,土壤粒径较细(表 6),具有良好的胶结能力及肥力,因此其溪流中含有较多 NO_3^- 离子,这也与吕田河、东星河 NO_3^- 离子浓度较高的研究结果相一致。此外,根据相关性分析(图 5),NH_4^+ 与 NO_3^- 离子具有极显著正相关性($p<0.001$),相关系数为 0.72,这表明 NH_4^+ 浓度变化趋势与 NO_3^- 浓度变化趋势具有高度的一致性,其原因主要是土壤微生物的硝化作用。土壤中的硝化细菌在有氧条件下将 NH_4^+ 转化为 NO_3^-,再经地表径流输送至河道中。这也与 2020 年 1 月 4 日观测到的 NO_3^-、NH_4^+ 浓度变化较为相符。

表 4 流溪河水库流域坡度占比情况

坡度分级	坡度占比/%					
	吕田河	黄水溪	哪吒岭	安山河	东星河	整个流域
平均坡度	17.17	17.07	16.01	19.72	23.50	9.96
1 级坡度	1.01	1.17	1.31	0.57	0.46	0.89
2 级坡度	7.58	8.73	7.95	5.25	4.13	6.76
3 级坡度	35.58	34.26	39.73	27.90	19.72	30.42
4 级坡度	37.46	37.01	37.40	37.11	32.42	35.00
5 级坡度	18.37	18.82	13.61	29.18	43.28	26.93

表 5 流溪河水库流域土壤类型占比情况 单位:%

土壤类型	吕田河	黄水溪	哪吒岭	安山河	东星河	整个流域
人为堆积土	9.52	0	60.00	0	0	8.31
铁质低活性强酸土	76.19	100.00	40.00	100.00	41.67	35.57
简育低活性强酸土	14.29	0	0	0	25.00	35.80
腐殖质低活性强酸土	0	0	0	0	25.00	15.47
简育高活性强酸土	0	0	0	0	8.33	4.85

3.3 NH_4^+ 浓度变化的影响因素

采样期间 NH_4^+ 浓度总体较稳定,但不同溪流之间 NH_4^+ 浓度存在明显差异。弹性网络分析结果进一步证明 NH_4^+ 浓度受到人为堆积土的正面影响(表

7)。此外,分析结果还发现,平均相对湿度对其产生负面影响,这也与平均相对湿度可能影响流域碳氮营养盐浓度的研究[26]结论相一致。根据相关性分析(图 5),NH_4^+ 与 NO_3^- 离子具有极显著正相关性($p<0.001$),相关系数为 0.72,这表明 NH_4^+ 浓度变化趋势与 NO_3^- 浓度变化趋势具有高度的一致性。溪流中氮受到工业和农业活动的强烈影响,NH_4^+ 主要来自于农业活动,水库流域上游地区人类活动频繁,上游耕地面积广,土壤类型为人为堆积土(表 5),肥力较高,溪流通过地表径流、地下径流将土壤中的铵态氮输送至河道中。此外,尤其是源水地区碳氮营养物浓度极易受河岸环境因素影响[27]。哪吒岭位于上游,由于长期的矿产资源开发,作为浸矿剂的铵盐大量进入到附近水体,导致其 NH_4^+ 含量远高于其他溪流,且变幅较大。

表 6　流域内土壤类型属性

土壤类型	TOC 含量/($mg \cdot L^{-1}$)	砾石占比/%	沙土占比/%	淤泥占比/%	土壤质地
人为堆积土	1.12	10	34	45	粉砂土
铁质低活性强酸土	0.98	28	41	18	砂质黏壤土
简育低活性强酸土	1.24	6	22	22	黏土
腐殖质低活性强酸土	1.80	21	43	23	砂质黏壤土
简育高活性强酸土	1.16	7	35	33	壤土

表 7　NH_4^+ 浓度 Elastic Net 回归分析结果

显著自变量	线性回归拟合方程	λ 值	MAE	MSE	RMSE
人为堆积土(Sas) 平均相对湿度(Srh)	$NH_4^+=0.30-0.07Srh+0.03Sas$	0.176	0.12	0.024	0.15

4　结 论

(1)枯水期间,流溪河水库流域碳氮营养盐浓度总体较稳定,河水碳氮营养盐浓度在流域内部不同溪流之间存在显著的空间差异。

(2)气象条件变化影响流域碳氮营养盐的浓度,其中平均相对湿度可通过影响大气湿沉降过程,将大气中的碳氮营养盐输入到地表径流,从而对流域碳氮营养盐浓度产生显著影响。同 DOC 相比,NH_4^+ 和 NO_3^- 对气象条件敏感度较低。

(3)地貌特征如坡度、土壤类型等显著影响流域碳氮营养盐浓度。3 级以上坡度土壤的淋洗和侵蚀过程较强,有助于增加陆源碳氮营养物经由径流进入溪流,对流域内碳氮营养盐浓度上升起到正面影响;相反,缓坡则对碳氮营养盐浓度升高起到抑制作用。NO_3^- 受简育低活性强酸土正面影响显著。

(4)流域碳氮营养盐浓度受到土地利用如建成区、农业活动等人类活动的显著影响,建成区面积增加降低森林有机凋落物,与 DOC 浓度呈负相关关系;相反,森林覆盖度扩大增加土壤有机物分解和硝化作用过程,对溪流 DOC 及 NO_3^- 浓度产生正面影响。

参考文献:

[1] Takagi M, Haga H. Carbon and nitrogen exports from forested headwater catchment in southwestern Japan[J]. Biogeochemistry, 2019, 145(1/2): 35-46.

[2] Connolly C T, Khosh M S, Burkart G A, et al. Watershed slope as a predictor of fluvial dissolved organic matter and nitrate concentrations across geographical space and catchment size in the Arctic[J]. Environmental Research Letters, 2018, 13: e104015.

[3] Cheng H, Lin C, Wang L, et al. The influence of different forest characteristics on non-point source pollution: A case study at Chaohu Basin, China[J]. International Journal of Environment Research and Public Health, 2020, 17(5): e1790.

[4] Zarnetske J P, Bouda M, Abbott B W, et al. Generality of hydrologic transport limitation of watershed organic carbon flux across ecoregions of the United States[J]. Geophysical Research Letters, 2018, 45(21): 11702-11711.

[5] Dee M M, Tank J L. Inundation time mediates denitrification end products and carbon limitation in constructed floodplains of an agricultural stream[J]. Biogeochemistry, 2020, 149(2): 141-158.

[6] dos Santos V M, de Andrade L C, Tiecher T, et al. The urban pressure over the sediment contamination in a Southern Brazil Metropolis: The case of Diluvio stream [J/OL]. Water Air and Soil Pollution, 2020, 231(4): 156. DOI: 10.1007/s11270-020-04504-2.

[7] Gao T G, Kang S C, Zhang Y L, et al. Characterization, sources and transport of dissolved organic carbon and nitrogen from a glacier in the Central Asia[J]. Science of the Total Environment, 2020, 725: e138346.

[8] Aitkenhead-Peterson J A, Steele M K. Dissolved organic carbon and dissolved organic nitrogen concentrations

and exports upstream and downstream of the Dallas-Fort Worth metropolis, Texas, USA[J]. Marine and Freshwater Research,2016,67(9):1326-1337.

[9] Rizinjirabake F, Tenenbaum D E, Pilesjo P. Sources of soil dissolved organic carbon in a mixed agricultural and forested watershed in Rwanda[J/OL].Catena,2019,181. DOI:10.1016/j.catena.2019.104085.

[10] Liu K S, Liu Y Q, Jiao N Z, et al. Bacterial community composition and diversity in Kalakuli, an alpine glacial-fed lake in Muztagh Ata of the westernmost Tibetan Plateau[J/OL].Fems Microbiology Ecology,2017, 93(7). DOI: 10.1093/femsec/fix085.

[11] 温展明,徐健荣,林秋奇,等.流溪河水库敞水区轮虫多样性与群落的动态特征[J].生态学报,2017,37(4):1328-1338.

[12] 王艳杰,唐红渠,姜仕军.流溪河水库沉积物粒度的时空分布及其沉积动力学意义[J].生态科学,2015,34(3):1-6.

[13] Strohmenger L, Fovet O, Akkal-Corfini N, et al. Multi-temporal relationships between the hydroclimate and exports of carbon, nitrogen, and phosphorus in a small agricultural watershed[J].Water Resources Research, 2020,56(7):1-17.

[14] 卓泉龙,林罗敏,王进,等.广州流溪河氮磷浓度的季节变化和空间分布特征[J].生态学杂志,2018,37(10):3100-3109.

[15] 中华人民共和国自然资源部.第三次全国国土调查技术规程 TD/T 1055-2019[S/OL].[2019-01-28]. https://www.biao-zhun.cn/637.html.

[16] 贾俊平,何晓群,金勇进.统计学[M].4 版.北京:中国人民大学出版社,2009.

[17] Zou H, Hastie T. Regularization and variable selection via the elastic net[J].Journal of the Royal Statistical Society Series B-Statistical Methodology,2005,67:301-320.

[18] Lv S C, Wang F, Yan W J, et al. DOC fluorescence properties and degradation in the Changjiang River Network, China: Implications for estimating in-stream DOC removal [J].Biogeochemistry,2019,145(3):255-273.

[19] Osburn C L, Atar J N, Boyd T J, et al. Antecedent precipitation influences the bacterial processing of terrestrial dissolved organic matter in a North Carolina estuary[J].Estuarine Coastal and Shelf Science,2019, 221:119-131.

[20] Bol R, Lucke A, Tappe W, et al. Spatio-temporal variations of dissolved organic matter in a German forested mountainous headwater catchment[J].Vadose Zone Journal,2015,14(4):1-12.

[21] Bhattacharya R, Osburn C L. Spatial patterns in dissolved organic matter composition controlled by watershed characteristics in a coastal river network: The Neuse River Basin, USA[J]. Water Research, 2020, 169:e115248.

[22] Muwamba A, Amatya D M, Ssegane H, et al. Response of nutrients and sediment to hydrologic variables in switchgrass intercropped pine forest ecosystems on poorly drained soil[J/OL].Water Air and Soil Pollution, 2020, 231(9): 458. https://doi.org/10.1007/s11270-020-04808-3.

[23] Covino T. Hydrologic connectivity as a framework for understanding biogeochemical flux through watersheds and along fluvial networks[J]. Geomorphology, 2017, 277:133-144.

[24] Sedighi F, Darvishan A K, Zare M R. Effect of watershed geomorphological characteristics on sediment redistribution[J].Geomorphology,2021,375:e107559.

[25] Becerra-Rodas C, Little C, Lara A, et al. The role of streamside native forests on dissolved organic matter in forested and agricultural watersheds in Northwestern Patagonia[J/OL].Forests,2019,10(7):595. DOI:10.3390/f10070595.

[26] Siddiqui E, Pandey J, Pandey U, et al. Integrating atmospheric deposition-driven nutrients (N and P), microbial and biogeochemical processes in the watershed with carbon and nutrient export to the Ganga River[J]. Biogeochemistry,2020,147(2):149-178.

[27] Fovet O, Cooper D M, Jones D L, et al. Dynamics of dissolved organic matter in headwaters: Comparison of headwater streams with contrasting DOM and nutrient composition[J/OL]. Aquatic Sciences, 2020, 82(2). DOI:10.1007/s00027-020-0704-6.