

黄炜惠,马春子,何卓识,等. 河流营养物基准制定方法研究进展[J]. 环境工程技术学报,2021,11(1):129-134.

HUANG W H, MA C Z, HE Z S, et al. Progress in research on river nutrient criteria development methods[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2021, 11(1): 129-134.

## 河流营养物基准制定方法研究进展

黄炜惠,马春子\*,何卓识,张含笑,霍守亮

环境基准与风险评估国家重点实验室,中国环境科学研究院

**摘要** 河流营养物基准是进行河流营养状态综合评估、地表水标准修订的重要依据。系统论述了国内外河流营养物基准制定方法的最新研究进展,提出了河流营养物基准制定的程序及候选指标等,着重阐述了河流营养物基准制定的统计分析法、模型推断法和压力—响应模型法,并对河流营养物基准制定方法的发展趋势进行了展望。通过梳理和比较提出:河流营养物基准制定方法中,统计分析法中的参照河段法最能反映河流的自然状态,但使用历史河流数据和受人类干扰较小的河流数据都会造成河流的过保护,忽略气候变化等自然因素的影响会导致河流的欠保护;模型推断法需要大量数据资料构建表征水体特征的函数模型,其复杂性使该方法的应用存在较大难度;压力—响应模型是目前国内外学者研究的热点,但仍需深入探究在人类活动和气候变化影响下河流中营养物浓度与着生生物、特殊敏感种群之间的响应机制,加强营养物基准制定和河流管理需求的紧密结合。

**关键词** 河流;营养物基准;参照河段;压力—响应模型

中图分类号:X522 文章编号:1674-991X(2021)01-0129-06 doi:10.12153/j.issn.1674-991X.20200037

## Progress in research on river nutrient criteria development methods

HUANG Weihui, MA Chunzi\*, HE Zhuoshi, ZHANG Hanxiao, HUO Shouliang

State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences

**Abstract** River nutrient criteria is an important basis for the comprehensive evaluation of river nutrient status and the revision of surface water standards. The latest research progress of the methods for the formulation of river nutrient criteria at home and abroad was systematically discussed, and the procedures and candidate indicators for the formulation of river nutrient criteria put forward. The statistical analysis method, model inference method and pressure-response model method for the determination of river nutrient criteria were emphasized, and the development trend of the method for the determination of river nutrient criteria prospected. Through combing and comparison, it was proposed that among the formulation methods of river nutrient criteria, the reference section method in the statistical analysis could best reflect the natural state of the river, but the use of historical river data and the data of the river with less human interference would lead to the over-protection of the river, and the neglect of the impact of natural factors such as climate change would also lead to the under-protection of the river. The model inference method needed a large amount of data to construct a functional model representing the characteristics of water body, and its complexity made the application of this method more difficult. At present, the pressure-response model was a hot topic for scholars at home and abroad, but the response mechanism between nutrient concentration in rivers and biogenic and special sensitive populations under the influence of human activities and climate change still needed to be deeply explored, and the close combination of nutrient criteria formulation and river management needs should be strengthened.

**Key words** stream; nutrient criteria; reference stream reach; pressure-response model

收稿日期:2020-02-29

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFA0605003);国家自然科学基金优秀青年科学基金项目(51922010)

作者简介:黄炜惠(1996—),女,硕士研究生,主要研究方向为水环境质量演变及生态效应,huangweihui2020@163.com

\* 责任作者:马春子(1986—),女,高级工程师,硕士,主要从事营养物基准研究,xiaomachunzi@163.com

河流是在一定气候和地质条件下形成的天然泄水输沙通道,由高海拔到低海拔自然向下流动,流向海洋、湖泊和另一条河流。河流是自然界物质与能量运输的重要通道,对保育生态系统健康、调节气候、保持生物多样性等具有重要作用,是人类赖以生存的重要淡水资源<sup>[1]</sup>。近年来,由于人类对河流的不合理利用,使河道形态单一化,河流流速减缓,水体自净能力减弱,水体富营养化等问题加重,生物多样性减少,河流生态和使用功能严重受损<sup>[2]</sup>。世界各国都高度重视河流的生态保护和污染控制,我国对河流的生态保护起步较晚,在生态保护技术和管理能力方面急需提升<sup>[3]</sup>。

富营养化是河流受到损害而表现出的主要环境问题之一<sup>[4-6]</sup>。在流动的河流系统中,氮和磷的循环使营养物的控制更加复杂,营养物可以迅速向下游运输,而营养物输入的影响与营养物来源分离,使营养物来源控制变得更加复杂<sup>[6-8]</sup>。营养物可以通过释放或微生物转化由沉积物重新进入水体,因此,即使在河流外源污染减少后,由于河流内源的释放也可能使河流长期处于富营养化状态<sup>[9]</sup>。河流的富营养化使生态系统质量下降,导致河流生物群落结构和功能变化及淡水生物多样性损失<sup>[10-11]</sup>。

河流营养物基准是河流生态健康状况评价、水生态保护和管理的依据,是河流营养物标准制(修)订的依据。河流营养物基准是指营养物对河流产生的生态效应不危及河流及其下游水体功能或用途的最大可接受浓度或限值。数字化营养物基准可以提供明确的目标,有助于识别和评价河流系统富营养化程度,是控制河流营养物负荷、保护水质及生物完整性的重要依据<sup>[12]</sup>。但目前大多河流的压力—响应关系不明确,且受历史和当前人类活动等多重因素干扰<sup>[6]</sup>,这些因素包括栖息地的改变、退化和破碎化(水库和大坝的建设等),流态的改变(蓄水防洪等),污染,对资源的过度开发,引入非原生类群和气候变化<sup>[7,13]</sup>。据估计,目前只有 0.16% 的地球表面受到的人为干扰程度较小,这使得很少有河流处于原始或自然状态<sup>[14-15]</sup>。因此,河流营养物基准的制定面临着很多挑战,既要深入分析河流富营养化形成机制,又要科学筛选指标,确定合理的阈值范围<sup>[16]</sup>。笔者系统综述了国内外河流营养物基准的最新研究进展,提出目前河流营养物基准制定面临的挑战和发展趋势,以期推动河流营养物基准制定

的标准化。

## 1 河流营养物基准制定程序

### 1.1 总体程序

营养物基准制定的目的是评估河流在自然状况下的营养状态水平,是保护水质和恢复生态完整性的重要手段,其制定程序可概括为:1)确定河流营养物基准制定的目标,明确的需求和目标将有助于评估基准的制定及确定可实现的水质目标;2)建立河流分类特征,先将河流按类型分类,再按营养状态分类;3)筛选营养物基准候选变量,用于评估或预测河流富营养化的条件或程度,一般至少包括总氮(TN)、总磷(TP)、叶绿素 a(Chla)和浊度 4 个变量;4)开展补充监测,主要监测河流的营养物和藻类生物量;5)建立历史与现状数据库;6)选择河流营养物基准制定技术方法;7)提出河流营养物基准推荐值;8)基准值的验证、校正和应用。

### 1.2 河流系统分类方法

河流是自然因素和人为因素不断互相作用的结果,因此需要利用现有的河流形态条件进行河流分类<sup>[17]</sup>。河流在生物、生态、物理、化学特征等方面具有显著的差异,一个基准不可能适用于所有河流,不同特征的河流应采用不同的营养物基准。通过对区域内的河流系统进行分类,降低同一类别中河流地貌、水文、生物等特征的差异,同时根据分类结果确定不同类别河流的参照河流。河流的主要组成特征包括地貌、水文和生物:地貌特征决定了现有河道形态、水文过程以及河水中生源物质;河流的水文变化特征(流量、水文节律等)决定了栖息地动植物种类及其生物化学过程;河流中生物包括水体及河岸带植物、大型无脊椎动物、底栖藻类和鱼类等,其受河流水文和水体营养物的影响,能反映河流物理化学特性,具有一定指示性。

河流系统分类主要包括基于物理因素和基于营养梯度 2 种方法。河流的物理因素是影响河流中生物的种类和丰富度的控制变量<sup>[18]</sup>,具有较高的稳定性并容易获得,是河流分类首要考虑的因素。河流基于物理因素分类最早是根据生态区进行分类,即通过叠加自然景观特征(如地貌、地质、土壤、气候、土地利用)进行等级划分<sup>[19]</sup>。目前欧洲等国家普遍使用的河流分类方法是在生态分区的基础上细化河流特征,包含河道形态(如宽度、深度、坡度、横截面、河岸和河床、有无水库池塘等)<sup>[17]</sup>,水文特征

(如流速波动、洪水周期、季节变化等)<sup>[19]</sup>及河岸带土地覆盖类型<sup>[20]</sup>等数据,该方法涉及的具体数据需要根据实际情况进行收集与整理,工作量大,较为耗时,并需要相关专家的专业判断。营养梯度分类主要关注化学和生物指标,包括营养物质浓度、藻类生物量(如 Chla 浓度)和浊度,也包括土地利用和其他人为干扰指标<sup>[9]</sup>。由于易受到生物吸收或者吸附等影响,营养物质在水体中不稳定,因此,生物指标被认为是最有效的分类指标<sup>[9]</sup>,也可作为河流管理的生态目标。不同敏感类型的生物群落可以用于区分水质污染和水文变化(大坝、气候变化等)对河流生态退化的影响<sup>[21]</sup>。

### 1.3 河流营养物质基准候选指标

河流营养物质基准候选指标是评估或预测水体富营养化状况或程度的可测量水质变量,包括基本指标和二级响应指标。基本指标包括水体 TN 和 TP 浓度、底栖和附着藻类生物量(如 Chla 浓度)、浊度/透明度及流量。二级响应指标包括溶解氧(DO)浓度、pH、新陈代谢、自养指数、电导率等。

TN、TP、藻类生物量和浊度/透明度是美国国家环境保护局(US EPA)推荐制定生态区河流营养物质基准需要考虑的指标。其中,氮和磷是富营养化河流中的主要营养物质,是藻类生物量增加并达到较高水平的主要影响因素,是富营养化控制的主要指标。藻类生物量能直观反映水体富营养程度,藻类是产生过量、不良的固着生物丛或表面浮游生物的直接原因,过量藻类导致水体高度浑浊;Chla 浓度是藻类生物量的一种光合色素和敏感指标,是营养物质最重要的生物响应变量。河流流动状态的波动性较大,导致河流中营养物质浓度、藻类生物量以及浊度/透明度的测量结果变化较大,因此关注水体的流动状态将有助于确定河流的营养状态和制定基准,但流量不作为营养物质基准指标。

水体 DO 浓度、pH、底栖群落新陈代谢等二级响应变量都会随着藻类生产力变化而变化,一定程度上能反映水体营养状态。但这些二级响应变量也会受其他自然或人为污染的影响而发生变化,如水体 DO 浓度和 pH 还易受湍流、光、温度、缓冲能力等因素影响,底栖群落结构和数量也会因有机污染等发生变化。

## 2 河流营养物质基准制定方法

US EPA 于 2000 年发布了《河流营养物质基准制定技术指南》<sup>[9]</sup>,提出采用参照河段法、预测关系模

型法和已发布的营养物质阈值或建议藻类限值制定营养物质基准,2010 年又发布了《利用压力—响应关系推断数字化营养物质基准》,将河流营养物质基准制定方法发展为参照状态法、模型推断法和压力—响应模型法 3 种<sup>[22]</sup>。河流营养物质基准制定最理想的方法是在影响藻类生物量增长的非营养物质因素(如光照、流量)不存在的情况下确定营养物质基准。与湖泊相比,河流作为流动的生态系统,在制定营养物质基准时需要考虑营养物质与着生生物之间的响应关系,同时需要关注流量对河流营养状态和营养物质基准制定的影响<sup>[9]</sup>。笔者通过系统分析统计分析法、模型推断法和压力—响应模型法 3 种主要方法的优缺点和适应条件,探究河流营养物质基准制定方法的发展趋势。

### 2.1 统计分析法

统计分析法的基本假设是河流中有部分为高生态环境质量的河流,能够通过百分位确定参照状态,其结果易受河流样本大小和丰富度的影响<sup>[23]</sup>。统计分析法通常包括参照河段法、群体分布法和三分法。

参照河段是指相对没有受到干扰的河段,能够代表河流的自然生物完整性。参照河段的确定是河流营养物质基准制定的核心,确定方法主要包括根据已有的历史资料或古生态数据<sup>[4]</sup>进行评估、实地调查、生态模型预测、最佳专业判断法<sup>[24]</sup>。目前大多数河流受到人类活动和气候变化的影响,河流形态等性状发生改变,许多河流历史监测数据不全,需要在分析现阶段河流状况的基础上确定参照河段。实地调查判断参照河段的方法在欧洲应用较为普遍,但 Johnson 等<sup>[25]</sup>研究发现连续建模方法比实际调查得到的离散结果更准确。在基准制定过程中通常需要考虑专家意见,采用 2 个或 2 个以上的方法共同确定的参照河段具有较高的科学性<sup>[26]</sup>。参照河段法适用于受人类活动扰动较少的河流区域,一般选用参照河段频数分布上 1/4 点位作为河流营养物质基准。群体分布法是在区域内参照河段数量不足的情况下,选取整个区域的河流为样本(易遭受严重损害的河段排除在样本之外),采用群体分布的下 5%~25% 作为营养物质基准。三分法则是根据累积频数分布的数据,分为贫营养(下 1/3)、中营养(中 1/3)和富营养(上 1/3)3 类水体,取下 1/3 对应的数值作为营养物质基准。统计分析法准确性受所研究河流质量的影响,对贫营养、生态系统生物完整性较高的河流,设定较低的营养物质基准值会造成河流的过

保护;对受人为干扰的高营养负荷河流,设定较高的营养物基准值会造成河流的欠保护。因此,选择高质量河流是统计分析法的重要前提。

目前,统计分析法应用广泛,常与其他方法联合用于制定营养物基准值并评价其他方法。Chen 等<sup>[4,27]</sup>采用参照河段法、群体分布法及回归模型法分别推导了我国曹娥江和清河流域的河流营养物基准值,3 种方法得到的基准值近似,采用 3 种方法的平均值作为最终营养物基准值。Heatherly<sup>[23]</sup>联合使用参照河流法、群体分布法、压力—响应模型法和模型推断方法制定美国内布拉斯加州河流的营养物基准,发现以农业为主导的流域使用模型推断法和统计分析法得到的营养物基准值较为接近,而压力—响应模型方法得到的基准值较高。Cheng 等<sup>[28]</sup>在探究季风气候对我国滦河营养物基准值制定的影响时发现,参照河段用下 5% 得到的营养物基准值与用群体分布法 75% 得到的值近似。统计分析法是一种与其他营养物基准制定方法相互印证的方法,综合考虑多种方法将有助于河流营养状态的评价。

## 2.2 模型推断法

受当地河流污染和生态环境影响,统计分析法得到的结果会有较大差异,同时大多数区域很难获得参照河段的信息。模型推断法以流域自然条件、人类活动、营养物输入与响应指标的关系等信息为基础,采用水质、水文、水生态等模型相结合的反演模型模拟水体中营养物的赋存和运移,利用水体的历史数据对模型进行校准,可最终分析得到河流营养物变化的自然过程和人类活动对河流富营养化的影响。

目前土壤和水评估工具(SWAT)可以移除受人为活动影响的土地利用,用来模拟自然条件(森林和湿地),并预测不容易到达地区的参照状态。Makarewicz 等<sup>[29]</sup>采用 SWAT 模型,在去除土地利用等人为影响的情况下,考虑自然状况下的河岸侵蚀、河流地质、土壤类型和流域面积等数据进行了参照状态的模拟,建立了美国纽约西部受城市化和农业等人为影响严重的杰纳西河的营养物基准值。Heatherly 等<sup>[23,27]</sup>通过比较多种方法,提出在以农业为主导的地区,采用土地利用和 TN、TP 之间关系建立模型确定营养物基准值较为合理。Cheng 等<sup>[28]</sup>认为,影响河流营养物负荷的人为因素包括土地利用、人口密度和牲畜密度,提出以人为自变量,以观测到的营养物浓度的对数为因变量,以建立的回归

模型的截距表示营养物基准值。此外,可以利用模型设置不同排放情景来预测对应的营养物基准值。Ulrike 等<sup>[30]</sup>利用营养物排放预测模型 MONERIS 模拟了 4 种排放模式下氮、磷输入河流的排放量,确定德国波罗的海流域河流 TP 的参照浓度低于 0.05 mg/L, TN 的参照浓度低于 1.00 mg/L。

## 2.3 压力—响应模型法

压力—响应模型是在营养压力数据及其响应变量之间建立一定的压力—响应关系。营养物压力数据主要指 TN、TP 浓度,可以通过实测得到,也可以通过营养物负荷模型将河流中 TN、TP 浓度与营养物点源和非点源相关联,以推测营养物的来源、分布和浓度。响应变量主要包括大型无脊椎动物、藻类、鱼类等生物的丰富度、组成或其他相关指数。压力—响应模型法的局限性在于多种因素会对压力—响应变量之间关系产生影响,这些影响因素包括河流流量、栖息地条件、流域土地利用、悬浮物和有机物浓度等。在复杂的水生生态系统中,需要基于实际河流的特征考虑更多的方法来支持压力—响应关系推断的信息,否则可能会使制定的营养物基准不合理,导致河流的过保护或欠保护。

由于其他环境因素的干扰,生物指标和营养物浓度梯度之间的关系不是线性的,通常呈现出非线性等特点,因此,选择响应指标和建立压力—响应关系成为目前研究的热点。McLaughlin 等<sup>[31]</sup>以美国俄亥俄州东部玉米带平原农业生态区内的溪流为研究对象,利用贝叶斯网络(Bayesian network)模型评估了营养物和河流大型无脊椎动物群落之间的响应关系。Qian 等<sup>[32]</sup>利用贝叶斯网络模型和传统统计建模方法建立了连续变量的贝叶斯网络模型,根据可溶解氮浓度与生物指标之间的压力—响应关系,制定了保护美国俄亥俄州溪流生物多样性的河流营养物基准。Heatherly<sup>[23]</sup>采用 6 个无脊椎动物和 5 个鱼类指标,利用随机森林预测法建立压力—响应模型,制定了美国内布拉斯加州河流营养物基准。Ashton 等<sup>[33]</sup>研究了 TN 及其形态与美国马里兰州可涉水溪流中的大型无脊椎动物群落之间的关系。

不同种类生物的敏感性促进了生物指标的应用,但过于敏感的生物指标可能会导致河流的过保护<sup>[23]</sup>,因此生物指标与影响因素之间的响应关系仍需不断探究。Theodoropoulos 等<sup>[21]</sup>利用一种新的底栖大型无脊椎动物多量度指数评估河流水文的改变状况,用于区分水体污染和水文(大坝、气候变化等)条件改变对营养物状况恶化的影响。Hausmann

等<sup>[34]</sup>提出基于硅藻的生物状态梯度法(BCG)用于评估河流的损害程度和制定河流的营养物基准,并推导了美国新泽西州河流的营养物基准。Elias等<sup>[35]</sup>利用硅藻组成,根据研究区域内河流受人类影响程度不同,采用改进的最低干扰条件方法探究了葡萄牙西部沿海河流营养物基准。Charles等<sup>[36]</sup>综合考虑硅藻组合和生物状态梯度概念,结合多位生物学家多年经验判断的新方法,确定了美国新泽西州河流的营养物基准。

### 3 河流营养物质基准制定方法的发展趋势

目前通常采用参照河段法制定河流营养物质基准,参照河段最能真实反映某一生态区河流的原始状态,但尚未形成统一筛选参照河段的标准方法,而且气候变化和大气污染等问题也使参照河段的获得变得越来越困难。模型推断法十分复杂,需要大量的数据构建表征水体特征的函数模型并进行相关参数率定,使营养物质基准的制定存在较大难度。压力一响应模型是国内外学者研究的热点,表征生态状态的生物指标与指定用途之间的关系是制定营养物质基准最相关和最有效的方法<sup>[37]</sup>,将成为河流营养物质基准制定的发展方向。河流营养物质基准的制定面临着以下挑战。

(1)深入研究人类活动和气候变化影响下河流营养物质浓度与着生生物、特殊敏感种群之间的响应机制。相关研究表明,在气候变化背景下,需要制定更严格的基准以缓解气候变化对营养物质-藻类响应关系的影响<sup>[38-39]</sup>。硅藻种群与水生生物的营养物浓度有强烈的相关性,被广泛用于表征营养状态和损伤程度<sup>[36]</sup>,能够描述河流生态系统的复杂性、稳定性和功能性。因此,需要建立营养物质与硅藻等敏感种群之间的响应关系,确定生态退化的河流营养物质基准值。

(2)研究河流多级闸坝、断流和渠道化等特点对河流营养物质基准制定的影响。大坝被认为是影响河流生态系统完整性最严重的人为干扰<sup>[40]</sup>,大坝阻碍了氮、磷等营养物质沿河网的流动,导致营养物的强化转化和消除;梯级水坝通常会对流域内或更大区域内的河网产生累积效应,导致河流破碎化、水文变化和泥沙淤积<sup>[8,40-41]</sup>,严重改变营养物质与着生藻类的响应关系。多级闸坝、断流和渠道化等使河流破碎化,制定河流营养物质基准时需要考虑其生态流量。

(3)营养物质基准的制定应与河流管理需求紧密结合。加快河流营养物质基准向标准的科学转化,建

立以富营养化标准为基础的河流管理框架和营养物质削减技术体系,为河流污染治理和生态系统综合修复提供配套的管理政策。

### 参考文献

- [1] 张远,高欣,林佳宁,等.流域水生态安全评估方法[J].环境科学研究,2016,29(10):1393-1399.  
ZHANG Y, GAO X, LIN J N, et al. Research on evaluation methods for riverine aquatic ecological security[J]. Research of Environmental Sciences, 2016, 29(10): 1393-1399.
- [2] 张远,夏瑞,张孟衡,等.水利工程背景下河流华暴发成因分析及模拟研究[J].环境科学研究,2017,30(8):1163-1173.  
ZHANG Y, XIA R, ZHANG M H, et al. Research progress on cause analysis and modeling of river algal blooms under background of mega water projects [J]. Research of Environmental Sciences, 2017, 30(8): 1163-1173.
- [3] 霍守亮,席北斗,陈奇,等.湿地营养物质基准制定方法研究[J].环境工程技术学报,2012,2(3):179-183.  
HUO S L, XI B D, CHEN Q, et al. Study on development methods of wetland nutrient criteria [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2012, 2(3): 179-183.
- [4] CHEN J B, LI F Y, WANG Y J. Estimating the nutrient thresholds of a typical tributary in the Liao River Basin, Northeast China[J]. Scientific Reports, 2018, 8(1):3810.
- [5] JI X L, DAHLGREN R A, ZHANG M H. Comparison of seven water quality assessment methods for the characterization and management of highly impaired river systems[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2016, 188:15.
- [6] SEDDON E, HILL M, GREENWOOD M T, et al. The use of palaeoecological and contemporary macroinvertebrate community data to characterize riverine reference conditions [J]. River Research and Applications, 2019, 35(8):1302-1313.
- [7] REID A J, CARLSON A K, CREED I F, et al. Emerging threats and persistent conservation challenges for freshwater biodiversity [J]. Biological Reviews, 2019, 94(3):849-873.
- [8] MAAVARA T, CHEN Q W, van METER K, et al. River dam impacts on biogeochemical cycling[J]. Nature Reviews Earth & Environment, 2020, 1:103-116.
- [9] Nutrient criteria technical guidance manual: rivers and streams [R]. Washington DC: Office of Water, US EPA, 2000.
- [10] ARTHINGTON A H, DULVY N K, GLADSTONE W, et al. Fish conservation in freshwater and marine realms: status, threats and management [J]. Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems, 2016, 26:838-857.
- [11] SÁNCHEZ-BAYO F, WYCKHUYS K A. Worldwide decline of the entomofauna: a review of its drivers [J]. Biological Conservation, 2019, 232:8-27.
- [12] 霍守亮,马春子,席北斗,等.湖泊营养物质基准研究进展[J].环境工程技术学报,2017,7(2):125-133.  
HUO S L, MA C Z, XI B D, et al. Progress in research on lake nutrient criteria [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2017, 7(2): 125-133.
- [13] STRAYER D L, DUDGEON D. Freshwater biodiversity conservation: recent progress and future challenges [J]. Journal of the North American Benthological Society, 2010, 29(1):

- 344-358.
- [14] REID M A, CHILCOTT S, THOMS M C. Using palaeoecological records to disentangle the effects of multiple stressors on floodplain wetlands[J]. *Journal of Paleolimnology*, 2018, 60(2): 247-271.
- [15] VÖRÖSMARTY C J, MCINTYRE P B, GESSNER M O, et al. Global threats to human water security and river biodiversity[J]. *Nature*, 2010, 467: 555-561.
- [16] BOULEAU G, PONT D. Did you say reference conditions? ecological and socio-economic perspectives on the European Water Framework Directive [J]. *Environmental Science and Policy*, 2015, 47(1): 32-41.
- [17] KUJANOVÁ K, MATOUŠKOVÁ M. Identification of hydromorphological reference sites using the new REFCON method, with an application to rivers in the Czech Republic[J]. *Ecology and Hydrobiology*, 2017, 17(3): 235-245.
- [18] WIMMER R, CHOVANEC A, MOOG O, et al. Abiotic stream classification as a basis for a surveillance monitoring network in Austria in accordance with the EU Water Framework Directive [J]. *Acta Hydrochimica Et Hydrobiologica*, 2010, 28(4): 177-184.
- [19] AGRA J U M, LIGEIRO R, MACEDO D R, et al. Ecoregions and stream types help us understand ecological variability in Neotropical reference streams [J]. *Marine and Freshwater Research*, 2019, 70(4): 594-602.
- [20] KUJANOVÁ K, MATOUŠKOVÁ M, HOŠEK Z. The relationship between river types and land cover in riparian zones [J]. *Limnologica*, 2018, 71(1): 29-43.
- [21] THEODOROPOULOS C, KARAOUZAS I, VOURKA A, et al. ELF: a benthic macroinvertebrate multi-metric index for the assessment and classification of hydrological alteration in rivers [J]. *Ecological Indicators*, 2020, 108(1): 105713.
- [22] Using stressor-response relationships to derive numeric nutrient criteria[R]. Washington DC: Office of Water, US EPA, 2010.
- [23] HEATHERLY II T. Acceptable nutrient concentrations in agriculturally dominant landscapes: a comparison of nutrient criteria approaches for Nebraska rivers and streams [J]. *Ecological Indicators*, 2014, 45(1): 355-363.
- [24] GRANADOS M, MANDRAK N E, JACKSON D A. Synthesizing reference conditions for highly degraded areas through best professional judgment [J]. *Journal of Great Lakes Research*, 2014, 40(Suppl 2): 37-42.
- [25] JOHNSON R K, HALLSTAN S. Modelling outperforms typologies for establishing reference conditions of boreal lake and stream invertebrate assemblages [J]. *Ecological Indicators*, 2018, 93(1): 864-873.
- [26] LIU Z T. Water quality criteria green book of China[M]. Berlin: Springer, 2015: 23-77.
- [27] CHEN J B, LU J. Establishment of reference conditions for nutrients in an intensive agricultural watershed, Eastern China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2014, 21(4): 2496-2505.
- [28] CHENG P, LI X Y. Establishing reference nutrient conditions using improved statistical methods in a river network with typical monsoon climatic pattern [J]. *Ecological Indicators*, 2018, 89: 260-268.
- [29] MAKAREWICZ J C, LEWIS T W, REA E, et al. Using SWAT to determine reference nutrient conditions for small and large streams [J]. *Journal of Great Lakes Research*, 2015, 41(1): 123-135.
- [30] ULRIKE H, JUDITH M, MATHIAS G, et al. Reference conditions for rivers of the German Baltic Sea Catchment; reconstructing nutrient regimes using the model MONERIS [J]. *Regional Environmental Change*, 2014, 14(3): 1123-1138.
- [31] MCLAUGHLIN D B, RECKHOW K H. A Bayesian network assessment of macroinvertebrate responses to nutrients and other factors in streams of the Eastern Corn Belt Plains, Ohio, USA [J]. *Ecological Modelling*, 2017, 345: 21-29.
- [32] QIAN S S, MILTNER R J. A continuous variable Bayesian networks model for water quality modeling: a case study of setting nitrogen criterion for small rivers and streams in Ohio, USA [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2015, 69: 14-22.
- [33] ASHTON M J, MORGAN R P, STRANKO S. Relations between macroinvertebrates, nutrients, and water quality criteria in wadeable streams of Maryland, USA [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2014, 186(2): 1167-1182.
- [34] HAUSMANN S, CHARLES D F, GERRITSEN J, et al. A diatom-based biological condition gradient (BCG) approach for assessing impairment and developing nutrient criteria for streams [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 562: 914-927.
- [35] ELIAS C L, CALAPEZ A R, ALMEIDA S F P, et al. Determining useful benchmarks for the bioassessment of highly disturbed areas based on diatoms [J]. *Limnologica-Ecology and Management of Inland Waters*, 2015, 51: 83-93.
- [36] CHARLES D F, TUCCILLO A P, BELTON T J. Use of diatoms for developing nutrient criteria for rivers and streams: a biological condition gradient approach [J]. *Ecological Indicators*, 2019, 96: 258-269.
- [37] National strategy for the development of regional nutrient criteria [R]. Washington DC: Office of Water, US EPA, 1998.
- [38] LIU L N, MA C Z, HUO S L, et al. Impacts of climate change and land use on the development of nutrient criteria [J]. *Journal of Hydrology*, 2018, 563: 533-542.
- [39] HUO S L, HE Z S, MA C Z, et al. Stricter nutrient criteria are required to mitigate the impact of climate change on harmful cyanobacterial blooms [J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 569: 698-704.
- [40] YANG N, LI Y, ZHANG W L, et al. Cascade dam impoundments restrain the trophic transfer efficiencies in benthic microbial food web [J]. *Water Research*, 2020, 170(1): 115351.
- [41] CHEN W, OLDEN J D. Designing flows to resolve human and environmental water needs in a dam-regulated river [J]. *Nature Communications*, 2017, 8(1): 2158. ◇