

辽河流域太子河流域 N、P 和叶绿素 a 浓度空间分布及富营养化*

王 琼^{1,2}, 卢 聪¹, 范志平^{1**}, 李法云¹

(1: 辽宁石油化工大学生态环境研究院, 抚顺 113001)

(2: 湖南农业大学资源环境学院, 长沙 410128)

摘 要: 通过对太子河流域 46 个采样点溶解性无机氮、溶解性无机磷、总氮、总磷、电导率、pH、溶解氧和叶绿素 a 浓度及相关环境因子的测定, 分析氮、磷浓度与叶绿素 a 浓度的空间分布特征, 利用回归分析判别氮、磷与叶绿素 a 浓度的相关性, 冗余分析判别河流水质与环境因子的关系, 并初步评价太子河流域水体富营养化状况。结果表明: 太子河流域氮、磷浓度具有明显的空间异质性, 表现为上游浓度较低且变化较平稳, 辽阳段浓度逐渐上升且波动增大, 鞍山段浓度最高。冗余分析显示氮、磷浓度的空间分布特征与土地利用方式、海拔、河岸缓冲带宽度、植被多样性密切相关。叶绿素 a 浓度与氨氮、硝态氮、溶解性无机氮、溶解性无机磷、总氮、总磷和电导率呈显著正相关, 说明营养盐的增多在一定程度上会促进浮游藻类的增长。太子河流域水体富营养化评价综合指数显示, 太子河流域“中”营养状态点位有 27 个, 占 58.7%, “富”营养状态点位有 19 个, 占 41.3%, 没有“贫”、“重富”和“极富”营养状态。

关键词: 辽河流域; 太子河流域; 氮; 磷; 叶绿素 a; 富营养化; 空间分布

Eutrophication and spatial distribution of N, P and chlorophyll-a in the Taizihe River Basin, Liaohe River Catchment

WANG Qiong^{1,2}, LU Cong¹, FAN Zhiping^{1**} & LI Fayun¹

(1: Institute of Eco-environmental Sciences, Liaoning Shihua University, Fushun 113001, P.R.China)

(2: College of Resources and Environment, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, P.R.China)

Abstract: Dissolved inorganic nitrogen, dissolved inorganic phosphorous, total nitrogen, total phosphorus, conductivity, pH, dissolved oxygen and chlorophyll-a were monitored in 46 sections along the Taizihe River, Liaohe River Catchment to understand their spatial distributions. The relationships between dissolved inorganic nitrogen, dissolved inorganic phosphorous and chlorophyll-a concentration were identified using the regression analysis. The relationship between water quality and environmental influencing factors was identified using redundancy analysis. The results showed that distributions of nitrogen, phosphorous and chlorophyll-a concentration had a certain spatial-related variability. The concentration of nitrogen, phosphorous and chlorophyll-a were low and stable in the upstreams, and were increasing and fluctuating in reaches of Liaoyang. In the reaches of Anshan the concentrations were the highest. Redundancy analysis showed that the spatial distribution characteristics of N and P were closely related to the land use, altitude, width of the riparian buffer and vegetation diversity. Ammonia nitrogen, nitrate nitrogen, dissolved inorganic nitrogen, dissolved inorganic phosphorous, total nitrogen, total phosphorus, and conductivity were positively correlated with chlorophyll-a concentration. It indicated that nitrogen and phosphorous could promote the growth of alga. Eutrophication evaluation index in Taizihe River Basin showed that there were 27 sample sites in the mesotrophic level, 19 sample sites in a status of eutrophication, no oligotrophic, hyper eutrophic and extremely eutrophic status.

Keywords: Liaohe River Catchment; Taizihe River Basin; nitrogen; phosphorous; chlorophyll-a; eutrophication; spatial distribution

* 国家科技支撑计划“十二五”项目(2015BAD07B030102)、国家水体污染与治理科技重大专项(2012ZX07505-001-01)、辽宁省自然科学基金项目(2014020108)、辽宁石油化工大学环境科学与工程学科创新团队([2014]11号)和辽宁石油化工大学科研启动项目(2014XJJ-013、2014XJJ-014)联合资助。2016-03-08 收稿; 2016-05-30 收修改稿。王琼(1983~), 女, 博士, 助理研究员; E-mail: wangqiong0407@163.com.

** 通信作者; E-mail: zhiping_fan@hotmail.com.

流域是一个相对封闭、有着清晰边界的系统,同时又与外界保持着物质、能量和信息交换^[1]. 随着经济的发展,人类活动强烈地改变了流域水体中可溶性营养盐浓度^[2],从而破坏了水生态系统营养平衡,尤其是河流向湖泊及海洋的营养盐输入常常发生区域性积累而造成水体富营养化,引起浮游植物大量生长,导致水质恶化等一系列环境问题^[3-5]. 解决富营养化问题的根本途径是削减外源污染输入,而河流输入占营养盐输入的 62%~89%^[6]. 因此,从流域尺度上分析营养盐分布特征,揭示流域污染物输出负荷,及其与富营养化的机理联系,是水体富营养化防控的科学基础. 然而,目前作为湖泊、海域主要营养盐来源的河流,其富营养化程度常常被忽略. 我国现行的富营养化评价也主要是针对湖泊、海域水环境^[7-9],对于河流往往停留在水质是否达标和水体是否污染上^[5,10],河流富营养化及其主控因子对富营养化的协同和抑制作用还欠缺深入的认识和研究^[11]. 富营养化现象受多种环境因子影响,其中最为重要的 2 个参数即是溶解性无机氮、溶解性无机磷^[12-14]. 而叶绿素 a 作为水体浮游植物存量的重要表征指标之一,能够用于判断水体发生水华或赤潮的情况^[15]. 研究叶绿素 a 与氮、磷浓度的关系,对认识水体富营养化的形成机理及其与主控因子之间的耦合作用和机制,以及制定流域水环境管理对策都具有重要意义^[16-17].

太子河是辽宁省南部的主要河流之一,与浑河在三岔河合流为大辽河后至营口入渤海. 太子河流域是我国东北地区的经济核心,社会经济发展迅速,工业化程度较高^[18]. 在工农业快速发展的压力下,河流生态系统健康严重受损,大量营养盐随河流入海,诱发了近海海域水体富营养化^[19-21]. 2014 年渤海海域春、夏和秋季富营养化海域面积分别为 11220、10980 和 14530 km²,共发生赤潮 11 次,累积面积 4078 km²,在全国各海域中面积最大^[22]. 目前对近海海域及河口区氮、磷营养盐浓度及富营养化关系的研究已取得一些进展,如王焕松等^[23]对辽东湾海域进行水体富营养化的模糊综合评价,张志锋等^[24]对渤海富营养化现状、机制及其与赤潮的时空耦合性的研究. 然而河口、海湾营养物质最主要的来源是上游河流的输入,但对入海河流富营养化程度究竟如何,叶绿素 a 浓度的分布与易于生物利用的可溶态氮、磷之间是否存在联系,各河段营养盐的输出量是多少,迄今少见报道. 因此,本研究通过对太子河流域 46 个采样点水体中氨氮、硝态氮、亚硝态氮、溶解性无机氮、溶解性无机磷、总氮、总磷和叶绿素 a 浓度的测定,分析太子河流域水体中营养盐浓度的空间异质性,结合水文数据计算各河段营养盐的输出量,并分析水体中营养盐与叶绿素 a 的关系,探讨太子河流域各河段对氮磷入海通量的贡献及水体潜在富营养化危险,以期为流域、海域富营养化防治提供科学依据,为流域水生态管理提供参考依据.

1 研究区概况

太子河流域(40°29'~41°39'N,122°26'~124°53'E)(图 1),太子河有南北两个源头,南支的源头在本溪

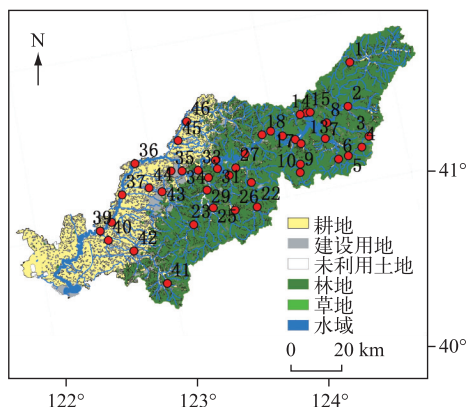


图 1 太子河流域采样点位

Fig.1 Location of sampling sites in the Taizihe River Basin

县东营坊乡羊湖沟草帽顶子山麓,北支的源头在新宾满族自治县平顶山镇鸿雁沟,南北二支于南甸子镇汇合为太子河干流,向西流经本溪、鞍山、辽阳三市,在三岔河与浑河一起汇入大辽河,于营口市注入渤海,流域面积为 1.39×10^4 km². 太子河流域属温带季风气候,年内温差较大,多年平均气温 2.27~9.99℃. 年降水量约 655~954 mm,降雨多集中在 6—9 月,占全年降雨的 71.2%. 年蒸发散为 734~1018 mm,多年平均天然径流量为 44.96×10^8 m³. 流域内自然植被类型为落叶阔叶林,上游地区为低山丘陵,植被保护较好,中下游为平原区,土地开发程度高. 太子河河岸带土壤以草甸土和棕黄土为主.

2 材料与方法

2.1 样品采集

于 2014 年 6 月 12 日—7 月 18 日期间,在太子河流域内选取了 46 个采样点位(图 1)进行调查. 调查时用 GPS

定位仪确定样点的经度、纬度和海拔高度. 同时对左右岸河岸带宽度、河岸带草本层盖度、土地利用方式等环境影响因子进行调查. 利用 GIS 软件获取太子河流域各种土地利用类型所占的比例(表 1).

表 1 太子河流域土地利用结构
Tab.1 Land-use structures in the Taizihe River Basin

采样区域	采样点	土地利用类型
上游	1、2、3、4、5、6、7、8	耕地 1%~2%,林地 98%,其他类型用地所占比例不足 1%
本溪段	9、10、11、12、13、14、15、16、17、18、19、20	多数区域耕地 1%,林地 99%,其他类型用地所占比例较少 17、18 采样点区域耕地 7%,林地 93%
辽阳段	21、22、23、24、25、26、27、28、29、30、31、32、33、34、35、45、46	市区附近耕地 87%,林地 8%,水域 4%,建设用地 1% 21、22、25、26 采样点区域耕地 7%,林地 89%,水域 4%,其他类型用地所占比例较少
鞍山段	36、37、38、39、40、41、42、43、44	耕地 92%,林地 1%,草地 1%,水域 4%,建设用地 2%海城河源 头 41 采样点区域耕地 2%,林地 98%

2.2 样品分析方法

采用 YSI 多参数水质分析仪(professional plus) 现场测定水温、pH 值、溶解氧(DO)、电导率. 同时采集 1000 ml 水样,加三氯甲烷固定后放置于密封容器中置于 4℃ 保温箱带回实验室,测定氨氮(NH₃-N)、硝态氮(NO₃⁻-N)、亚硝态氮(NO₂⁻-N)、溶解性无机氮(DIN)、溶解性无机磷(DIP)、总氮(TN)、总磷(TP)和叶绿素 a(Chl.a) 浓度等化学指标,水样的保存和预处理严格按照《水和废水监测分析方法》进行^[25],NH₃-N 浓度采用纳氏试剂比色法测定,NO₃⁻-N、NO₂⁻-N 浓度采用紫外分光光度法测定,TN 浓度采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法测定,DIN=NH₃-N+NO₃⁻-N+NO₂⁻-N. TP 浓度采用钼酸铵分光光度法测定,DIP 浓度采用钼锑抗分光光度计法测定. Chl.a 浓度采用丙酮萃取分光光度计法测定. 同时,为减小系统误差,以上样品均重复测定 3 次,数据分析过程中取其平均值.

2.3 数据分析

利用 SPSS 18.0 统计软件进行相关分析和方差分析,除趋势对应分析(DCA)和冗余分析(RDA)采用 Canoco 4.5 软件进行.

3 结果

3.1 太子河流域水质状况

太子河流域 NH₃-N 浓度在 0.126~0.696 mg/L 范围内波动,平均值为 0.388 mg/L,其中 2 个点位符合国家 I 类地表水环境标准,41 个点位符合国家 II 类地表水环境标准,3 个点位符合国家 III 类地表水环境标准. NO₃⁻-N 浓度变化范围在 0.260~3.890 mg/L 之间,平均值为 3.143 mg/L. NO₂⁻-N 浓度变化范围在 0.002~0.029 mg/L 之间,平均值为 0.092 mg/L. 各采样点 DIP 浓度在 0.013~0.069 mg/L 范围内变化,平均值为 0.109 mg/L, DIN 浓度在 0.469~4.426 mg/L 范围内变化,平均值为 1.570 mg/L. TN 浓度变化范围在 1.2~11.17 mg/L 之间,平均值为 3.75 mg/L,其中 7 个点位符合国家 IV 类地表水环境标准,8 个点位符合国家 V 类地表水环境标准,31 个点位超过国家 V 类地表水环境标准. TP 浓度变化范围在 0.015~3.004 mg/L 之间,平均值为 0.193 mg/L,其中 4 个点位符合国家 I 类地表水环境标准,30 个点位符合国家 II 类地表水环境标准,6 个点位符合国家 III 类地表水环境标准,2 个点位符合国家 IV 类地表水环境标准,5 个点位超过国家 V 类地表水环境标准. DO 浓度在 4.3~12.5 mg/L 之间波动,平均值为 8.9 mg/L,DO 变化无趋势可循. Chl.a 浓度在 0.3~39.1 μg/L 之间波动,平均值为 10.2 μg/L.各采样点 pH 值在 6.93~9.07 范围内波动,平均值为 7.627. 电导率在 0.063~1.202 mS/cm 范围内波动,平均值为 0.629 mS/cm,且 1[#]~44[#] 采样点呈明显的上升趋势(图 2).

3.2 太子河流域水质空间差异性分析

从太子河流域水质状况的分析中可以看出明显的地域分段,太子河流域 NH₃-N、NO₃⁻-N 浓度在 1[#]~20[#] 采样点较小,并且变化趋于平稳,这些点位均分布在太子河流域上游和本溪段;21[#]~35[#] 采样点 NH₃-N、

NO_3^- -N 浓度呈现逐步上升趋势, 这些采样点分布在辽阳段; 而 NH_3 -N、 NO_3^- -N 浓度的峰值出现在 38#~44# 采样点, 这些点位分布在鞍山段。 NO_2^- -N 浓度在各采样点没有明显的变化趋势。 DIN 浓度在 1#~37# 采样点较小且变化趋于平稳, 峰值出现在 38#~44# 采样点, 分布在鞍山段。 Chl.a 浓度在太子河流域的分布趋势与 NH_3 -N 和 NO_3^- -N 浓度趋势相近, 在 1#~11# 采样点较小, 12#~33# 采样点呈现逐步上升趋势, 峰值出现在 34#~44# 采样点之间。 故对各采样河段水质进行单因素方差分析, 结果显示, 太子河流域上游段和本溪段电导率、pH、 NH_3 -N、 NO_3^- -N、 NO_2^- -N、DIN、DIP、TP、TN 和 Chl.a 浓度均没有显著差异 ($P>0.05$) (表 2)。 所有河段 pH 均没有显著差异 ($P>0.05$)。 鞍山段和辽阳段 NH_3 -N 浓度显著高于本溪段和上游 ($P<0.05$), 鞍山段与辽阳段没有显著差异 ($P>0.05$)。 鞍山段 NO_3^- -N 和 DIN、TP、TN 浓度显著大于辽阳段、本溪段和上游 ($P<0.05$), 辽阳段 NH_3 -N 浓度显著大于本溪段 ($P<0.05$), 但与上游区无显著差异 ($P>0.05$)。 辽阳段和鞍山段 NO_2^- -N 浓度显著大于上游 ($P<0.05$), 与本溪段无显著差异 ($P>0.05$)。 鞍山段 DIP 浓度显著高于其它河段 ($P<0.05$), 其它河段间无显著差异 ($P>0.05$)。 Chl.a 浓度和电导率表现为鞍山段显著大于辽阳段, 辽阳段显著大于上游和本溪段 ($P<0.05$)。

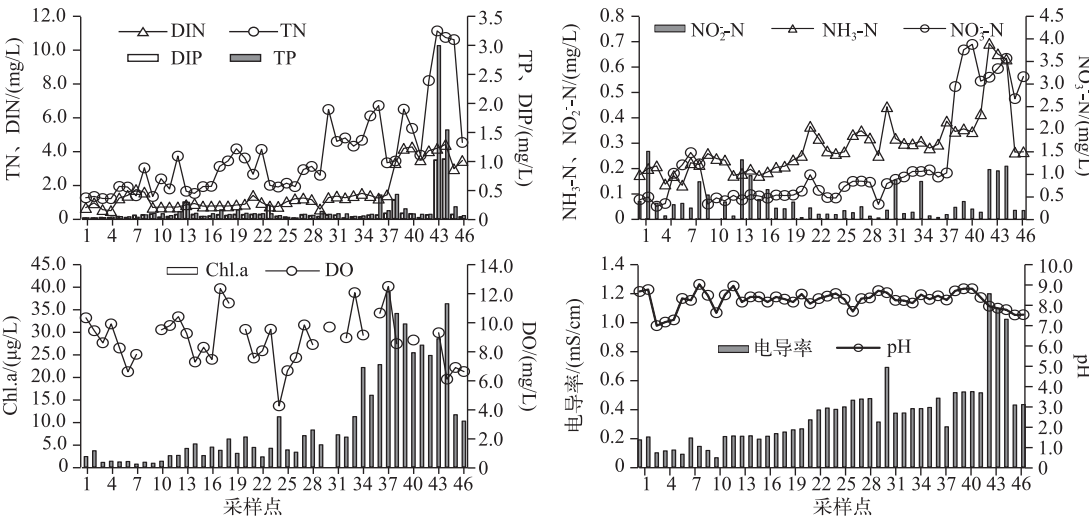


图 2 太子河流域水质状况

Fig.2 Water quality in the Taizihe River Basin

表 2 太子河流域各河段水质指标差异性分析(平均值±标准误)*

Tab.2 One way ANOVA of water quality factors in each sections in Taizihe River Basin

水质指标	上游	本溪段	辽阳段	鞍山段
电导率/(mS/cm)	0.142±0.009 ^a	0.212±0.009 ^a	0.424±0.013 ^b	0.684±0.061 ^c
pH	8.127±0.143 ^a	8.351±0.057 ^a	8.248±0.054 ^a	8.356±0.075 ^a
NH_3 -N/(mg/L)	0.192±0.009 ^a	0.207±0.005 ^a	0.307±0.008 ^b	0.459±0.029 ^b
NO_3^- -N/(mg/L)	0.754±0.088 ^{ab}	0.502±0.011 ^a	1.044±0.114 ^b	2.857±0.205 ^c
NO_2^- -N/(mg/L)	0.090±0.014 ^a	0.083±0.012 ^{ab}	0.040±0.007 ^b	0.088±0.017 ^b
DIP/(mg/L)	0.038±0.005 ^a	0.078±0.020 ^a	0.060±0.012 ^a	0.313±0.080 ^b
DIN/(mg/L)	1.036±0.088 ^{ab}	0.784±0.013 ^a	1.390±0.114 ^b	3.405±0.228 ^c
TP/(mg/L)	0.032±0.017 ^a	0.113±0.065 ^a	0.077±0.043 ^a	0.660±0.994 ^b
TN/(mg/L)	1.651±0.630 ^a	2.548±1.003 ^{ab}	4.091±2.219 ^b	6.594±2.982 ^c
Chl.a/(μg/L)	1.467±0.200 ^a	3.861±0.336 ^a	8.410±0.809 ^b	30.063±1.059 ^c

* 同行间不同字母代表差异显著, 显著性水平 0.05.

3.3 水质指标与 Chl.a 浓度的相关分析

太子河流域水质指标及 Chl.a 浓度相关分析显示, $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 DIN 、 DIP 、 TN 、 TP 和电导率与 Chl.a 浓度呈显著正相关 ($P<0.01$, 表 3)。图 3 是太子河流域水质状况各指标与 Chl.a 的回归分析图。线性方程能很好地描述 Chl.a 与 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 DIN 、 DIP 、电导率、 TN 和 TP 的关系, R^2 分别为 0.5222、0.5555、0.5834、0.2472、0.4794、0.4258 和 0.2099, 其中, $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 和 DIN 的 R^2 值大于 0.5, 是影响 Chl.a 浓度的关键因子。Chl.a 浓度与 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 DIP 和电导率拟合的直线斜率较大, 说明随 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 DIP 和电导率的增加 Chl.a 浓度增加较快, 而 Chl.a 浓度与 DIN 和 $\text{NO}_3\text{-N}$ 拟合的直线斜率较小, 说明随 DIN 和 $\text{NO}_3\text{-N}$ 浓度的增加 Chl.a 浓度增加较缓慢。

表 3 太子河流域水质指标及 Chl.a 浓度相关分析

Tab.3 Correlations coefficients between water quality factors and chlorophyll-a concentration in Taizihe River Basin

指标	电导率	pH	$\text{NH}_3\text{-N}$	$\text{NO}_3\text{-N}$	DIP	DIN	$\text{NO}_2\text{-N}$	TN	TP	Chl.a
电导率	1.00	-0.03	0.92 **	0.65 **	0.62 **	0.71 **	0.16	0.78 **	0.60 **	0.68 **
pH		1.00	-0.05	-0.05	-0.09	-0.05	0.00	-0.11	-0.14 **	0.10
$\text{NH}_3\text{-N}$			1.00	0.63 **	0.63 **	0.69 **	0.19	0.74 **	0.62 **	0.70 **
$\text{NO}_3\text{-N}$				1.00	0.47 **	0.99 **	0.10	0.69 **	0.45 **	0.75 **
DIP					1.00	0.52 **	0.36 *	0.63 **	0.91 **	0.50 **
DIN						1.00	0.16	0.72 **	0.49 **	0.76 **
$\text{NO}_2\text{-N}$							1.00	0.11 **	0.34 *	0.05
TN								1	0.63 **	0.65 **
TP									1	0.46 **
Chl.a										1.00

* 显著性水平 0.05, ** 显著性水平 0.01.

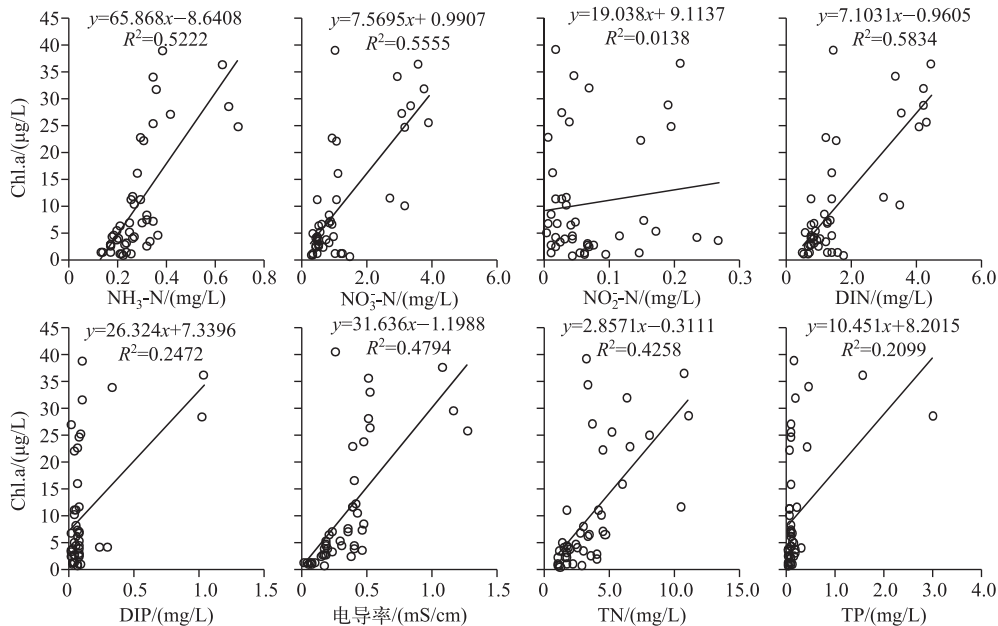


图 3 太子河流域 Chl.a 浓度与水质指标的回归分析

Fig.3 Regression models between chlorophyll-a concentration and water quality factors in Taizihe River Basin

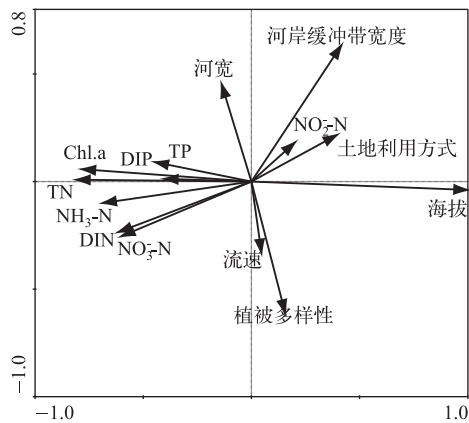


图 4 太子河流域水质与环境因子 RDA 排序图

Fig.4 RDA for water quality factors and environmental factors in Taizihe River Basin

3.4 太子河流域水质指标与环境因子的关系

为了分析太子河流域 DIN、DIP、TN、TP、Chl.a 等水质指标变化原因,进行水质指标与河宽、河岸缓冲带宽度、植被多样性、土地利用方式、河宽、海拔等环境因子的冗余分析. DCA 分析结果说明,太子河流域 DIN、DIP、TN、TP、Chl.a 等水质指标的最大梯度长度为 0.112,因此本研究采用线性模型 RDA 进行排序分析. 根据 RDA 的结果(表 5),排序轴 1、2 的累积贡献率为 97.9%,可以较好地反映水质指标与环境因子的关系. RDA 排序描述了太子河流域 DIN、DIP、TN、TP、Chl.a 等水质指标与环境因子的关系(图 4). 结果表明,所有的水质指标均沿着第 1 轴排列,除 NO₂-N 外都在轴的左侧,环境因子中除了河宽、植被多样性和流速外,其他也均沿着第 1 轴排列,但都在轴的右侧,表明水质指标与河岸缓冲带宽度、土地利用方式和海拔呈负相关. Chl.a 浓度除了与缓冲带宽度、土地利用方式和海拔呈负相关外,也与流速和植被多样性呈一定的负相关.

表 5 太子河流域水质指标与环境因子的 RDA 结果

Tab.5 RDA analysis for water quality and environmental factors in Taizihe River Basin

排序轴	特征值	水质指标-环境因子相关系数	水质指标贡献率/%	水质指标与环境因子的累积贡献率/%
1	0.480	0.778	48.0	95.4
2	0.012	0.379	49.3	97.9
3	0.009	0.409	50.2	99.7
4	0.001	0.170	50.3	100

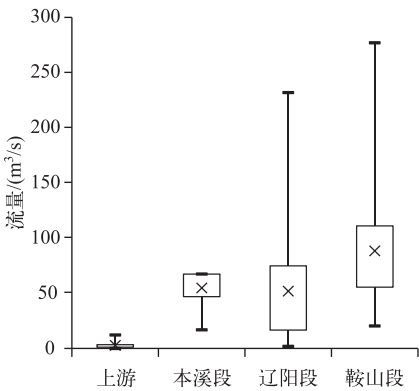


图 5 太子河流域 6—7 月流量

Fig.5 Water discharge in Taizihe River Basin from June to July

3.5 氮、磷输出量

根据水利部太子河流域主要水文站 6—7 月的流量实时监测数据(图 5),计算 NH₃-N、NO₃-N、DIN、DIP、TN 和 TP 在 6—7 月通过主要河段的输出量(图 6),结果表明, NH₃-N、NO₃-N、DIN、TN 输出量均表现为上游<本溪段<辽阳段<鞍山段, NH₃-N 输出量分别为 1.36、11.49、16.14 和 40.84 g/s, NO₃-N 输出量分别为 5.35、27.86、54.94 和 254.27 g/s, DIN 输出量分别为 7.34、43.52、73.16 和 302.96 g/s, TN 输出量分别为 11.70、141.35、215.31 和 586.81 g/s. DIP 和 TP 输出量均表现为上游<辽阳段<本溪段<鞍山段, DIP 输出量分别为 0.27、3.13、4.35 和 27.82 g/s, TP 输出量分别为 0.22、4.07、6.25 和 58.72 g/s.

3.6 潜在富营养化分析

采用广泛适用于我国湖泊、水库和河流水体富营养化评价的对数型幂函数普适指数公式,计算水体富营养化评价综合指数(EI),并依据富营养状态的各级分级标准, EI<20 贫营养级, 20≤EI<39.42 中营养级, 39.42≤EI<61.29 富营养级, 61.29≤EI<76.28 重富营养级, 76.28≤EI<99.77 极富营养级. 评价各采样点水体所处的营养状态,其公式为:

$$EI = 10.77 \times \sum_{j=1}^n W_j \cdot (\ln x_j)^{1.1826}$$

式中, W_j 为指标 j 的归一化权重值, 本研究将各指标视作等权重; EI_j 为指标 j 的富营养化评价普适指数; x_j 为指标 j 的“规范值”, 其计算方法见文献[26].

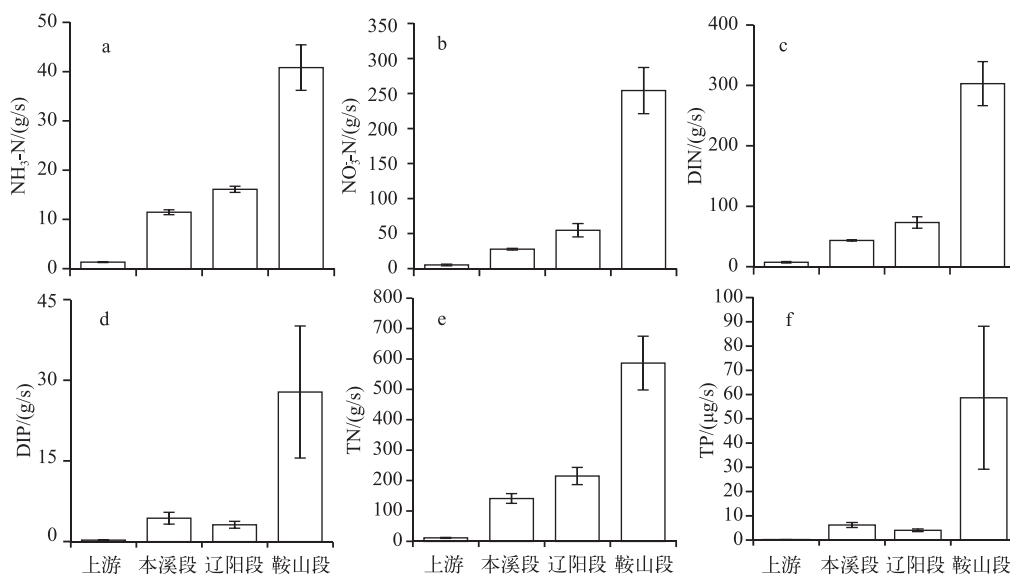


图 6 太子河流域主要河段 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、DIN、DIP、TN 和 TP 输出量

Fig.6 Change of $\text{NH}_3\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$, DIN, DIP, TN and TP output quantity in each section of Taizihe River Basin

结合富营养状态分级标准, 可知太子河流域所有点位营养状态均为“中”和“富”, 其中“中”营养状态 27 个, 占 58.7%, “富”营养状态 19 个, 占 41.3%, 没有“贫”、“重富”和“极富”营养状态. EI 最低值出现在 4# 采样点, 为 24.26, 最高值出现在 43# 采样点, 为 69.15. EI 值由上游至下游呈现逐渐上升趋势, 平均值为 39.69 (图 7).

4 讨论

4.1 太子河流域 N、P、Chl.a 浓度空间分布趋势分析

太子河流域 N、P 具有明显的空间异质性, 表现为上游浓度较低且变化较平稳, 辽阳段 N、P 浓度逐渐上升且波动增大, 鞍山段 N、P 浓度最高. 分析其原因主要受到太子河流域外源污染物输入源随机性和区域性影响. 从太子河流域土地利用结构 (表 1) 可以看出, 太子河流域上游地区以林地为主占总面积的 98% 以上, 本溪段也以林地为主要类型. 很多研究指出流域中林地和草地所占面积的百分比与水体中 N、P 浓度呈负相关, 而流域中耕地面积百分比与 N、P 浓度呈正相关^[26-28]. 辽阳段和鞍山段以农业用地为主要类型, 农业用地中农药、化肥的过量使用, 不合理农业灌溉, 以及养殖业的发展, 导致农业面源污染对太子河造成了持续的营养压力, 超过河流的自净能力, 使辽阳段和鞍山段 DIN、DIP 浓度逐渐上升^[29-31]. 并且辽阳和鞍山段工业和城市建筑等土地利用方式逐渐增多, 工业污水特殊的源输入形式造成 DIN、DIP 浓度波动起伏. 本研究中 N、P 及 Chl.a 浓度与环境因子的冗余分析结果 (图 4) 也显示, 土地利用方式与 N、P 浓度及 Chl.a 浓度呈显著负相关.

除此之外, 氮、磷及 Chl.a 浓度与河岸缓冲带宽度和海拔呈负相关 (图 4). 河岸缓冲带宽度对水质的影响主要与植被对 N、P 的削减作用有关^[26]. 很多研究表明河岸带植被可有效控制入河 N、P 污染物, 是截留陆

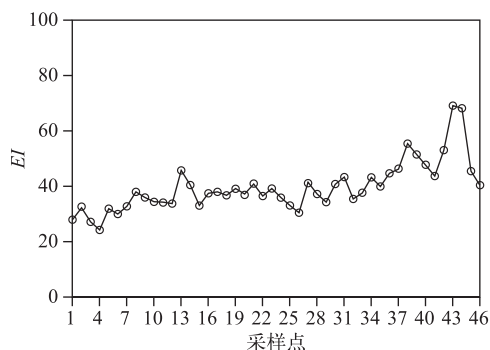


图 7 太子河流域水体营养评价综合指数

Fig.7 EI values in the Taizihe River Basin

域面源污染物、改善河道水质的有效手段^[32-34]。太子河流域上游海拔高,难于耕作,因此植被保持完好,土壤受到的人为干扰小,因此土壤营养元素含量高;而太子河下游为平原地区,是辽宁省重要的粮食生产基地,农业种植发达,很多地方的耕作已经到了河道附近,受到降水的影响,大量农业面源污染进入河水中,致使下游 N、P 浓度增大。

Chl.a 浓度在太子河流域的分布趋势与 N、P 浓度趋势相近,流域的营养源输入具有多元性和分布的不均匀性,其生物可利用形态也随输入的不同而产生差异,从而造成 Chl.a 浓度的时空分布特征差异。太子河上游地区主要是山林,河水中营养盐浓度偏低,本溪段、辽阳段、鞍山段人口数量、农业用地面积、城市化不断增大,导致水体中营养盐浓度不断升高,其中辽阳段和鞍山段工业化增多导致部分点位营养盐浓度突增,引起 Chl.a 浓度增大。

4.2 Chl.a 与 N、P 浓度关系分析

浮游植物的生长和营养盐因子之间的关系非常密切,浮游植物通过光合作用吸收水中的 N、P 合成细胞所必需的物质,Chl.a 作为浮游植物存量的表征指标,与 N、P 浓度的关系较为复杂^[35-36]。本文水体中 Chl.a 浓度与 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、DIN、DIP、TN、TP 和电导率呈显著正相关,说明可溶性 N、P 在一定程度上促进浮游藻类的增长。有关水体中营养盐直接或间接影响其中浮游植物生物量的工作,已有大量的报道^[37-39]。目前普遍接受的观点是:虽然不同的浮游藻类在其生长过程中对营养盐有各自不同的需求,但在多数河湖中,浮游藻类的生物量与水体中的营养盐浓度变化趋势是一致的。水体中 N、P 浓度并不总是与藻类的增殖呈正比,而是表现出非常复杂的关系。一些研究指出,N、P 是水体浮游植物生长必不可少的物质基础,其浓度变化可影响浮游植物的数量,而浮游植物的生长状况又可导致营养盐浓度变动,因此产生了 N、P 与 Chl.a 浓度在特定时期呈显著负相关关系的现象,这说明藻类在生长过程中消耗了部分 N、P^[40]。除此之外,氮磷比(N/P 比)也是限制水生植物生长的主要原因。水体中浮游植物一般都按 Redfield 比值来摄取营养盐,必然有一部分 N (对 P 限制水体而言)或 P (对 N 限制水体而言)相对过剩。这些富余的营养盐实际上并不能被浮游植物利用,因此并未对水体富营养化作出实质贡献^[41]。在淡水环境中,藻类生长期水体中 N/P 比 <7 ,N 是可能的限制性营养盐,而 N/P 比 >7 ,则 P 是可能的限制性营养盐。太子河流域 46 个采样点中有 31 个点位 TN 浓度超过了国家 V 类地表水环境标准,而 TP 浓度只有 5 个点位超过国家 V 类地表水环境标准,水体 N/P 比平均值为 46.5,可以看出太子河流域水体富营养化进程中 P 浓度相对略低,即 P 是可能的限制性营养盐。从 N、P 浓度与 Chl.a 浓度的回归分析中也可以看出(图 3),DIN 和 TN 与 Chl.a 浓度的拟合曲线的斜率分别为 7.103 和 2.857,显著小于 DIP 和 TP 与 Chl.a 浓度拟合曲线的斜率(26.324 和 10.451),说明随着水体中 P 浓度的增加 Chl.a 浓度增加的较快,要控制水体的富营养化进程,关键可能在于控制 P 的污染负荷。

4.3 太子河流域富营养状况分析

河流水体中 N、P 营养盐浓度严重超标,势必造成水体富营养化。国际公认的富营养化阈值为 $\text{TP}=0.02\text{ mg/L}$, $\text{TN}=0.2\text{ mg/L}$ ^[42],太子河所有点位的 TN、大部分点位的 TP 都超过了富营养化阈值。从 Chl.a 浓度看, $<3\text{ }\mu\text{g/L}$ 的水体为贫营养, $3\sim7\text{ }\mu\text{g/L}$ 为中营养, $7\sim40\text{ }\mu\text{g/L}$ 为富营养, $>40\text{ }\mu\text{g/L}$ 为重富营养,太子河流域贫营养、中营养、富营养的点位分别有 13、14 和 19 个,没有重富营养的点位。这说明太子河流域部分点位高营养盐并未引起藻类的大量生长。吴怡等^[40]的研究中也指出在相对较高的 N、P 浓度下,河流 Chl.a 浓度仅为湖泊的 1/10 乃至 1/100。出现这种现象一方面是由于河流的水动力条件制约了浮游植物的生长。另一方面 Chl.a 浓度的分布可能还受其他因素决定,如温度、光照、水量和流速等水动力条件与特征的影响^[43-44]。本研究进一步采用了广泛适用于我国湖泊、水库和河流水体富营养化评价的对数型幂函数普适指数公式,通过计算水体富营养化评价综合指数,评价了太子河流域水体的营养状态。从结果来看太子河流域所有点位营养状态均为“中”和“富”营养状态,其中“中”营养状态占 58.7%，“富”营养状态占 41.3%。这与上述对理化因子浓度分析的结论一致。相对于湖泊和海域而言,河流受人类影响更为直接,而当承载高浓度营养盐的河水汇入湖泊和海洋,无疑将增加湖泊和海域的富营养化压力。本研究中,太子河下游地区 TN、TP 的输出量分别为 586.81 和 58.72 g/s,这些 N、P 将汇入大辽河进入渤海,对附近海域生态安全造成影响,这将成为区域河流水环境治理的新问题和关注点。

5 结论

1) 太子河流域 N、P 具有明显的空间异质性,表现为上游浓度较低且变化较平稳,辽阳段浓度逐渐上升且波动增大,鞍山段最高。冗余分析显示 N 和 P 的空间分布特征与土地利用方式、海拔、河岸缓冲带宽度和植被多样性密切相关。

2) 太子河流域 Chl.a 浓度范围为 0.3~39.1 $\mu\text{g/L}$,平均值为 10.2 $\mu\text{g/L}$ 。Chl.a 浓度与 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、DIN、DIP、TN、TP 和电导率呈显著正相关,说明营养盐的增多在一定程度上会促进浮游藻类的增长。

3) 太子河流域水体富营养化评价综合指数(EI)显示,太子河流域“中”营养状态点位 27 个,占 58.7%,“富”营养状态点位 19 个,占 41.3%,没有“贫”、“重富”和“极富”营养状态。但水体中 N、P 浓度相对较高,当承载高浓度营养盐的河水汇入海洋,将增加附近海域的富营养化压力。

6 参考文献

- [1] Cheng Guodong, Li Xin. Integrated research methods in watershed science. *Science China: Earth Sciences*, 2015, **45**(6): 811-819. [程国栋, 李新. 流域科学及其集成研究方法. 中国科学: 地球科学, 2015, **45**(6): 811-819.]
- [2] Nguyen DT, Harada M, Hiramatsu K. Evaluation of the water-quality dynamics in a eutrophic agricultural pond by using a one-box ecosystem model considering several algal groups. *Paddy and Water Environment*, 2010, **8**(4): 301-318.
- [3] Anderson DM, Glibert PM, Burkholder JM. Harmful algal blooms and eutrophication: Nutrient sources, composition, and consequences. *Estuaries*, 2002, **25**(4): 704-726.
- [4] Glibert PM, Burkholder JM. Harmful algal blooms and eutrophication: “strategies” for nutrient uptake and growth outside the Redfield comfort zone. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2011, **29**(4): 724-738.
- [5] Chen H, Sun C, Wu Y. Analysis of trend of nutrient structure and influencing factors in Changjiang Estuary and its adjacent sea during 23 years. *Marine Environmental Science*, 2011, **30**(4): 551-553.
- [6] Chen Nengwang, Wu Yinqi, Zhang Yuzhen *et al.* Linking watershed nutrient loads and riverine export to reservoir eutrophication: The case of Shanzai Reservoir, Fujian Province. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, **32**(9): 1862-1869. [陈能汪, 吴殷琪, 张玉珍等. 流域氮磷输出、河流输送与库区富营养化关联分析——以福建山仔水库为例. 农业环境科学学报, 2013, **32**(9): 1862-1869.]
- [7] Li Junlong, Zheng Binghui, Liu Yong *et al.* Classification of estuaries in China based on eutrophication susceptibility to nutrient load. *Science China: Earth Sciences*, 2015, **23**(4): 455-467. [李俊龙, 郑丙辉, 刘永等. 中国河口富营养化对营养盐负荷的敏感性分类. 中国科学: 地球科学, 2015, **23**(4): 455-467.]
- [8] He Yongfeng, Li Haocheng, Zhu Yongjiu *et al.* Status and spatial-temporal variations of eutrophication in Lake Changhu, Hubei Province. *J Lake Sci*, 2015, **27**(5): 853-864. DOI:10.18307/2015.0511. [何勇凤, 李昊成, 朱永久等. 湖北长湖富营养化状况及时空变化(2012—013 年). 湖泊科学, 2015, **27**(5): 853-864.]
- [9] Wang Yan, Jiang Xia, Li Yongfeng *et al.* Spatial and temporal distribution of nitrogen and phosphorus and nutritional characteristics of water in Dongting Lake. *Research of Environmental Sciences*, 2014, **27**(5): 484-491. [王岩, 姜霞, 李永峰等. 洞庭湖氮磷时空分布与水体营养状态特征. 环境科学研究, 2014, **27**(5): 484-491.]
- [10] Xu Peng, Gao Wei, Zhou Feng *et al.* New approach to assess the aquatic effects of watershed socio-economic development and its application in Lake Nansihu. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2013, **33**(8): 2285-2295. [徐鹏, 高伟, 周丰等. 流域社会经济的水环境效应评估新方法及在南四湖的应用. 环境科学学报, 2013, **33**(8): 2285-2295.]
- [11] Zhang Hong, Lin Chao, Lei Pei *et al.* Evaluation of river eutrophication of the Haihe River Basin. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, **35**(8): 2336-2344. [张洪, 林超, 雷沛等. 海河流域河流富营养化程度总体评估. 环境科学学报, 2015, **35**(8): 2336-2344.]
- [12] Wiley MJ, Hyndman DW, Pijanowski BC *et al.* A multi-modeling approach to evaluating climate and land use change impacts in a Great Lakes river basin. *Hydrobiologia*, 2010, **657**(1): 243-262.
- [13] Li X, Yang L, Yan W. Model analysis of dissolved inorganic phosphorus exports from the Yangtze river to the estuary. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2011, **90**(1): 157-170.
- [14] Wang J, Yan W, Chen N *et al.* Modeled long-term changes of DIN:DIP ratio in the Changjiang River in relation to Chl.a and DO concentrations in adjacent estuary. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2014. DOI: org/10.1016/j.ecss.2014.

- 11.028.
- [15] Lau SSS, Lane SN. Biological and chemical factors influencing shallow lake eutrophication: A long-term study. *Science of the Total Environment*, 2002, **288**(3): 167-181.
 - [16] Xavier D, Ruddick K, Lacroix G. Salinity predicts the distribution of chlorophyll a spring peak in the southern North Sea continental waters. *Journal of Sea Research*, 2015, **103**(1): 59-74.
 - [17] Fleming V, Andersenb JH, Carstensen J *et al.* Recent developments in assessment methodology reveal that the Baltic Sea eutrophication problem is expanding. *Ecological Indicators*, 2015, **48**(1): 380-388.
 - [18] Zhang Yuan, Chen Libin, Qu Xiaodong *et al.* Environmental factors and community characteristics of aquatic macrophytes in Taizi River Tributaries of Liaoning Province. *Journal of Wuhan Botanical Research*, 2011, **29**(5): 552-560. [张远, 陈立斌, 渠晓东等. 辽宁太子河大型水生植物的群落特征及其与环境的关系. 植物科学学报, 2011, **29**(5): 552-560.]
 - [19] Li Yanli, Xu Zongxue, Liu Xingcai. Spatial variability analysis of water nitrogen and phosphorus and their response to land-use structures in the Huntai River Basin. *Research of Environmental Sciences*, 2012, **25**(7): 770-777. [李艳利, 徐宗学, 刘星才. 浑太河流域氮磷空间异质性及其对土地利用结构的响应. 环境科学研究, 2012, **25**(7): 770-777.]
 - [20] Qin Yanwen, Zheng Binghui, Zhang Lei *et al.* Pollution characteristics analysis of water quality in Liaodong Bay from 2004 to 2008. *Research of Environmental Sciences*, 2010, **23**(8): 987-992. [秦延文, 郑丙辉, 张雷等. 2004—2008年辽东湾水质污染特征分析. 环境科学研究, 2010, **23**(8): 987-992.]
 - [21] Qu Limei, Yao De, Cong Pifu. Inorganic nitrogen and phosphate and potential eutrophication assessment in Liaodong Bay. *Chinese Journal of Environmental Science*, 2006, **27**(2): 263-267. [曲丽梅, 姚德, 丛丕福. 辽东湾氮磷营养盐变化特征及潜在性富营养评价. 环境科学, 2006, **27**(2): 263-267.]
 - [22] Hydrology Bureau of Liaoning Province. Liaoning water resources bulletin. Shenyang: Liaoning Provincial Department of Water Resources, 2015. [辽宁省水文局. 辽宁省水资源公报. 沈阳: 辽宁省水利厅, 2015.]
 - [23] Wang Huansong, Lei Kun, Li Zicheng *et al.* Fuzzy comprehensive evaluation of water eutrophication in Liaodong Bay. *Research of Environmental Sciences*, 2010, **23**(4): 413-419. [王焕松, 雷坤, 李子成等. 辽东湾海域水体富营养化的模糊综合评价. 环境科学研究, 2010, **23**(4): 413-419.]
 - [24] Zhang Zhifeng, He Xin, Zhang Zhe *et al.* Eutrophication status, mechanism and its coupling effect with algae blooming in Bohai. *Marine Environmental Science*, 2012, **31**(4): 465-483. [张志锋, 贺欣, 张哲等. 渤海富营养化现状、机制及其与赤潮的时空耦合性. 海洋环境科学, 2012, **31**(4): 465-483.]
 - [25] Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China, Editorial Board of Water and Wastewater Monitoring and Analysis Methods eds. Water and wastewater monitoring and analysis methods: 4th edition. Beijing: China Environmental Science Press, 2002. [国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法: 第4版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.]
 - [26] Allan JD. Landscape and riverscapes: The influence of land use on river ecosystems. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 2004, **35**: 257-284.
 - [27] Ahearn DS, Sheibley RW, Dahlgren RA *et al.* Land use and land cover influence on water quality in the last free-flowing river draining the western Sierra Nevada, California. *Journal of Hydrology*, 2005, **313**(3/4): 234-247.
 - [28] Xiao HG, Wei J. Relating landscape characteristics to non-point source pollution in mine waste-located watersheds using geospatial techniques. *Journal of Environmental Management*, 2007, **82**(1): 111-119.
 - [29] Fedorko EJ, Pontius RG, Aldrich SP *et al.* Spatial distribution of land type in regression models of pollutant loading. *The Biological Bulletin*, 2004, **207**(2): 173.
 - [30] Bahar M M, Ohmori H, Yamamuro M. Relationship between river water quality and land use in a small river basin running through the urbanizing area of Central Japan. *Limnology*, 2008, **9**(1): 19-26.
 - [31] Arheimer B, Liden R. Nitrogen and phosphorus concentrations from agricultural catchments influence of spatial and temporal variables. *Journal of Hydrology*, 2000, **227**(1): 140-159.
 - [32] Hefting M, Beltman B, Karssenberg D *et al.* Water quality dynamics and hydrology in nitrate loaded riparian zones in the Netherlands. *Environmental Pollution*, 2006, **139**(1): 143-156.
 - [33] Yan Lifeng, Shi Xianfeng, Yu Lizhong *et al.* Elimination effects of riparian vegetation buffer zones on surface water nitrogen and phosphorus in Shenyang suburbs. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2011, **19**(2): 403-408. [阎丽凤, 石险峰,

- 于立忠等. 沈阳地区河岸植被缓冲带对氮、磷的削减效果研究. 中国生态农业学报, 2011, **19**(2):403-408.]
- [34] Zhao Tongqian, Xu Huashan, Ren Yufen *et al.* Research progress in agricultural non-point nitrogen pollution control in riparian wetlands. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2008, **2**(11): 1441-1446. [赵同谦, 徐华山, 任玉芬等. 滨河湿地对农业非点源氮污染控制研究进展. 环境工程学报, 2008, **2**(11): 1441-1446.]
- [35] Carpenter SR, Bennett EM. Reconsideration of the planetary boundary for phosphorus. *Environmental Research Letters*, 2011, **6**(1): 14009-14020.
- [36] Tian Shimi, Yang Yang, Qiao Yongmin *et al.* Temporal and spatial distribution of phytoplankton chlorophyll-a and its relationships with environmental factors in Dongjiang River, Pearl River basin. *J Lake Sci*, 2015, **27**(1): 31-37. DOI:10.18307/2015.0104. [田时弥, 杨扬, 乔永民等. 珠江流域东江干流浮游植物叶绿素 a 时空分布及与环境因子的关系. 湖泊科学, 2015, **27**(1): 31-37.]
- [37] Song Yuzhi, Qin Boqiang, Gao Guang. Effect of nutrient on periphytic algae and phytoplankton. *J Lake Sci*, 2007, **19**(2):125-130. DOI:10.18307/2007.0203. [宋玉芝, 秦伯强, 高光. 氮及氮磷比对附着藻类及浮游藻类的影响. 湖泊科学, 2007, **19**(2):125-130.]
- [38] Wang Jun, Wei Xiaohang, Yao Weizhong *et al.* Relationship between chlorophyll a content and TN and TP concentrations in water bodies of south Taihu Lake. *Journal of Zhejiang Ocean University (Natural Science Edition)*, 2011, **30**(3): 190-193,204. [王俊, 韦肖杭, 姚伟忠等. 南太湖水体叶绿素 a 含量与氮磷浓度的关系. 浙江海洋学院学报(自然科学版), 2011, **30**(3): 190-193,204.]
- [39] Zhao Hanqu, Wei Xiaohang, Yao Weizhong *et al.* Relationships between chlorophyll-a content and TN, TP concentrations in coastal waters of south Taihu Lake. *Journal of Hydroecology*, 2011, **32**(5): 59-63. [赵汉取, 韦肖杭, 姚伟忠等. 南太湖近岸水域叶绿素 a 含量与氮磷浓度的关系. 水生生态学杂志, 2011, **32**(5): 59-63.]
- [40] Wu Yi, Guo Yafei, Cao Xu *et al.* Eutrophication and spatial distribution of chlorophyll-a, nitrogen and phosphorus in Funnan River, Chengdu City. *Environmental Monitoring in China*, 2013, **29**(4): 43-49. [吴怡, 郭亚飞, 曹旭等. 成都府南河叶绿素 a 和氮、磷的分布特征与富营养化研究. 中国环境监测, 2013, **29**(4): 43-49.]
- [41] Bulgakov NG, Levich A. The nitrogen: phosphorus ratio as a factor regulating phytoplankton community structure: nutrient ratios. *Archiv für Hydrobiologie*, 1999, **146**(1): 3-22.
- [42] Claude DB, Canfield DE, Bachman RW. Seasonal patterns of chlorophyll, nutrient concentrations and secchi disk transparency in Florida lakes. *Lake and Reservoir Management*, 1998, **14**(1): 60-76.
- [43] Zhang Wei, Sun Jian, Nie Hongtao *et al.* Seasonal and spatial variations of nutrient and the response of phytoplankton in PRE and adjacent sea areas. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, **35**(12): 4034-4044. [张伟, 孙健, 聂红涛等. 珠江口及毗邻海域营养盐对浮游植物生长的影响. 生态学报, 2015, **35**(12): 4034-4044.]
- [44] Wang Liqing, Xu Li, Lu Ziyuan *et al.* Dynamic of phytoplankton abundance and the relationship with environmental factors in Dianshan Lake, Shanghai. *Chinese Journal of Environmental Science*, 2011, **32**(10): 2868-2874. [王丽卿, 许莉, 卢子园等. 淀山湖浮游植物数量消长及其与环境因子的关系. 环境科学, 2011, **32**(10): 2868-2874.]