

松花江流域营养盐的空间分布及污染等级评价

焦珂伟, 李凤祥, 周启星*

(南开大学环境科学与工程学院, 环境污染过程与基准教育部重点实验室/天津市城市生态环境修复与污染防治重点实验室, 天津 300071)

摘要:应用综合污染指数法,结合2013—2014年对松花江流域进行水生态野外全面调查的结果,将流域内历时2年所调查的122个采样点的营养盐分为5个等级进行评价,分析流域内营养盐的污染状况及空间分布。结果表明:松花江流域营养盐评价等级(极好、好、一般、差和极差)的比例分别为10.66%、15.57%、20.49%、28.69%和24.59%,支流的评价结果明显好于干流;各子流域的营养盐污染程度排序为松花江干流>第二松花江>牡丹江>嫩江。研究区内土地利用类型与营养盐评价结果关系密切,尤其是农业非点源污染对流域含氮营养盐的影响较为显著。

关键词:松花江流域;营养盐;空间分布;土地利用

中图分类号:X522 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2015)04-0769-07 doi:10.11654/jaes.2015.04.023

Spatial Distribution and Pollution Level Evaluation of Nutrients in the Songhua River Basin

JIAO Ke-wei, LI Feng-xiang, ZHOU Qi-xing*

(MOE Key Laboratory of Pollution Processes and Environmental Criteria/Tianjin Key Laboratory of Environmental Remediation and Pollution Control, College of Environmental Science and Engineering, Nankai University, Tianjin 300071, China)

Abstract: In this research, 122 samples were obtained from the Songhua River Basin to investigate spatial distribution and pollution of nutrients in river water using the comprehensive pollution index method in combination with the results of the 2-year field survey of aquatic ecosystems from 2013 to 2014. The results showed that the percentages of the excellent, good, moderate, poor and terrible grades of nutrient assessment were respectively 10.66%, 15.57%, 20.49%, 28.69% and 24.59%. The lowest scores of nutrient assessment were found in the Nenjiang River, the Mudan River, the Songnen Plain, the Sanjiang Plain and the Second Songhua River Basin. Nutrient pollution was less in the tributaries than in the main streams. The pollution of the nutrients in river water was in order of the main stream of the Songhua River>the Second Songhua River>the Mudan River>the Nen River. The three nutrient indicators (TN, TP and $\text{NH}_3\text{-H}$) were significantly different. The assessment method based on grades divided by the same standards was feasible. Land use had profound impacts on nutrient pollution in river water, especially the non-point source pollution of agriculture that affected nitrogenous pollution more significantly.

Keywords: the Songhua River Basin; nutrient; spatial distribution; land use

水体富营养化是人类当前面临的一个重要生态环境问题。随着工农业生产的持续发展,大量的营养盐物质进入地表径流中,不仅影响水质,引起水体的富营养化,对浮游植物的生长繁殖造成很大影响^[1],同时也会产生一定程度的生态毒性作用。目前,全球约75%以上封闭型水体存在富营养化问题^[2],研究水体

营养盐污染及防治措施具有重要的现实意义。

1973年,OECD在18个成员国之间建立了国际富营养化研究合作计划。经过40余年的努力,在营养元素控制因素、富营养化水质改善、政策控制措施三个方面取得了诸多成果^[3]。近年来,国外研究者通过建立一些数学模型,如WASP模型^[4]、AGNPS模型^[5]、WSAT模型^[6]以及SCS-CN模型^[7],对营养盐的污染负荷进行估算,并对氮、磷等营养元素在全球尺度上的迁移和输出进行模拟和关联^[8-10]。我国所面临的水体富营养化威胁十分严重^[11-12],对131个主要湖泊的调查表明:氮、磷营养盐严重超标的湖泊有67个,占调查湖泊总数的51.2%^[13]。近20年来,国内学者对太

收稿日期:2014-11-06

基金项目:国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07501002-001)

作者简介:焦珂伟(1989—),男,黑龙江佳木斯人,硕士研究生,主要从事流域水生态分区与健康评价研究。

E-mail:jiaokw586@hotmail.com

*通信作者:周启星 E-mail:zhouqx@nankai.edu.cn

湖、洞庭湖等主要湖泊的富营养化控制和生态恢复开展了大量的研究,并取得了许多成功的经验^[14-15]。大量研究表明,长江、黄河等大尺度流域的营养盐含量也呈现出逐年上升的趋势^[16-18]。然而,我国对水体营养盐的研究存在的主要问题是:研究区域过于狭窄,主要集中在长江中下游地区;研究对象主要是湖体或河流入海口,对大流域整体营养盐污染的潜在影响和控制的研究还相对较少。因此,本研究在调查松花江流域营养盐污染情况的基础上,应用国内外文献的研究成果,结合综合污染指数法进行流域营养盐污染等级评价,以期松花江流域水环境质量和生态系统保护提供科学的管理依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

松花江是我国第三大河流,地处我国东北,在东经 119°52′至 132°31′、北纬 41°42′至 51°38′之间。流域东西向约 920 km,南北向约 1070 km,流域面积约为 55.68 万 km²,占东北地区总面积的 44.9%,占全国总面积的 5.8%。西部为大兴安岭与额尔古纳河(黑龙江的南源),北部以小兴安岭与黑龙江为界,东南部是张广才岭、老爷岭、完达山脉与乌苏里江、绥芬河、图们江和鸭绿江等流域,西南部是松花江和辽河的松辽分水岭,流域中部为松嫩平原,是流域内的主要农业区。

1.2 现场调查及采样

于 2013 年 7 月和 2014 年 7 月,对松花江流域的干流和支流进行了两次水生态系统现状调查。重点调查了 122 个点位的生态状况,其中松花江主干流及其支流共 29 个点位,嫩江干流及其支流共 41 个点位,第二松花江干流及其支流共 24 个点位,牡丹江干流及其支流共 28 个点位。具体的采样点位如图 1 所示。

水样采集按 HJ/T 91—2002《地表水和污水监测技术规范》^[19]进行,水质营养盐指标测定按《水和废水监测分析方法》^[20]进行。

1.3 营养盐评价指标的选取

营养盐指标的选取要充分考虑水生态系统的完整性,从水质与生物两方面来进行研究^[21-22]。营养盐常被用来表示水体受营养物质污染的程度,营养盐的状况对水生态可造成直接影响,尤其对水生态初级生产力而言尤为重要。松花江流域的地理位置决定了其水生态系统特征与国内其他流域有所不同,本研究根据松花江流域生态系统以及人为影响所产生的非点源

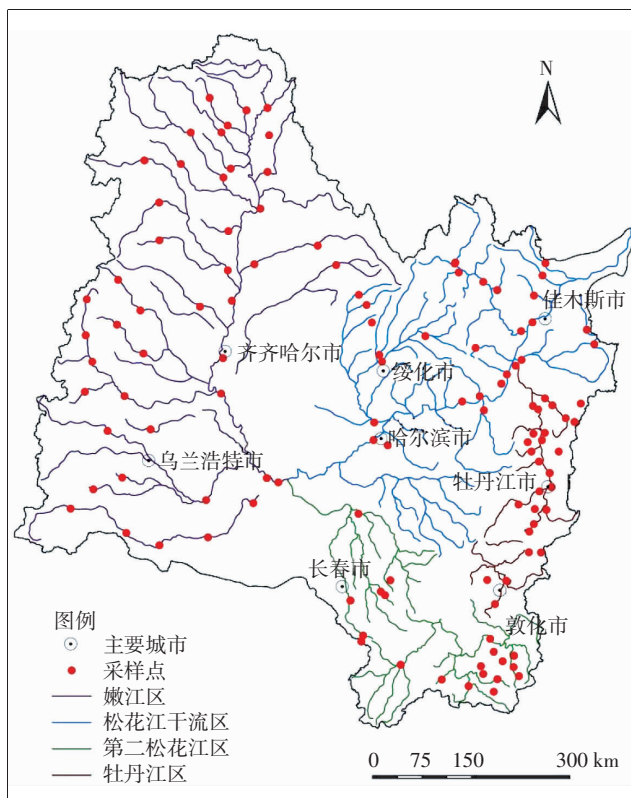


图 1 松花江流域采样点示意图

Figure 1 Sites of water sampling in Songhua River Basin

污染的具体情况,综合各因子的污染分担率,选取总氮(TN)和总磷(TP)作为营养盐指标进行水质评价。此外,水体中的氨氮(NH₃-N)达到一定水平,可导致水生生物中毒甚至死亡,严重影响河流的生态平衡,是典型的生物毒性指标。因此,选取 NH₃-N 作为本研究的营养盐评价生物方面的指标。

1.4 评价方法

为使不同类别的指标具有可比性,实现流域营养盐状况的综合评价,需通过消除量纲的处理方式对不同指标进行标准化运算。按照国内外已有文献^[23-26]的研究成果,依据下式进行标准化计算:

$$SV = \frac{V_{\max} - M}{V_{\max} - V_{\min}}$$

式中:SV 表示各指标的标准化值; $V_{\max}$ 、 $V_{\min}$ 分别指 GB 3838—2002《地表水环境质量标准》规定的 I 类与 IV 类水体相关指标的最大值和最小值^[23,26](表 1); M 指该样点营养盐指标的测量值。

对于松花江流域营养盐状况的评价,选取综合污染指数评价方法,通过对各营养盐指标的相对污染指数进行统计,得出代表营养盐污染的具体数值,用于确定污染程度和主要污染物,并对营养盐污染进行综

表 1 各指标标准化最小值与最大值
Table 1 Minimum and maximum values of standardized indicators of water quality

指标	最大值 Max	最小值 Min
总氮/mg·L ⁻¹	1.5	0.2
总磷/mg·L ⁻¹	0.3	0.02
氨氮/mg·L ⁻¹	1.5	0.15

合判断^[27]。在一般情况下综合污染指数评价方法的应用,是假设各参与评价因子对水质的贡献基本相同,采用各评价因子标准指数加和的算术平均值进行计算,同时反映多个水质参数与相应标准之间的综合对应关系^[28]。综合污染指数法的计算公式为:

$$P_N = \frac{SV_{TN} + SV_{TP} + SV_{NH_3-N}}{3}$$

式中: P_N 表示流域营养盐的综合评价得分; SV_{TN} 、 SV_{TP} 、 SV_{NH_3-N} 分别代表TN、TP和 NH_3-N 的标准化值,即指标得分。

值得注意的是, NH_3-N 以游离氨或铵盐的形式存在于水中^[29-30],对水生态系统造成污染后,可使鱼类死亡或形成亚硝酸盐危害人类的健康,所以 NH_3-N 是评价水体污染和“自净”状况的重要指标,在评价过程中应予以特殊考虑。本研究规定:当 NH_3-N 的评价得分为0时,该采样点营养盐综合评价得分为0。

根据采样点各营养盐指标的数据计算出评价得分后,将其分为5个等级(表2)。当某一营养盐指标的数值超过地表水Ⅳ类标准,或低于地表水Ⅰ类标准,即不在最大值与最小值的范围内时,根据公式计算出来的评价得分亦不在评价的范围内(0~1)。在这种情况下通过以下处理后进行评价:当评价得分大于1时按1计算;当其小于0时按0计算。

2 结果与讨论

2.1 营养盐的空间分布规律

从营养盐指标的空间分布来看,松花江流域营养盐综合评价结果在空间上的分布具有一定的规律性

表 2 营养盐评价得分值对应等级

Table 2 Scores and corresponding grades of nutrient assessment

评价得分 Assessment score	评价等级 Assessment grade	表示方法 Representation
0.0~0.2	极差	●
0.2~0.4	差	●
0.4~0.6	一般	●
0.6~0.8	好	●
0.8~1.0	极好	●

(图2)。整体的趋势为支流好于干流,上游强于下游。嫩江右岸大部分森林区和草原区的营养盐状况良好,基本都可以达到极好和好的水平,而其余大多数采样点都存在一定程度的营养盐污染情况,其中松花江干流、嫩江干流、牡丹江干流以及第二松花江流域的营养盐综合评价情况较差,水体富营养化的潜在风险很大。TN的评价得分除流域北源(嫩江上游)、嫩江右岸和南源(第二松花江上游)外,其他区域均处在较低的水平; NH_3-N 的评价结果除牡丹江流域的乌斯浑河、镜泊湖上游以及嫩江右岸之外,其他样点均存在着不同程度的污染;TP的评价得分普遍较高,污染较重的地区主要集中在嫩江中游部分地区,之后会随着河流的自净能力逐渐好转。

分析评价结果显示,在松花江流域内营养盐污染最显著的是TN污染,松嫩平原、松花江中下游地区由于农业中氮肥大量使用的影响而污染较重。经统计调查发现,松花江流域化肥施用量中氮肥最高,约占总化肥量的53.69%,磷肥占比为25.23%,复合肥占比21.07%^[31]。TP的空间分布呈现出比较令人满意的结果,大部分地区的TP浓度都维持在较好的水平,其整体的趋势为南部好于北部,下游好于上游。 NH_3-N 污染比较严重的地区主要集中在松嫩平原东部、第二松花江中上游以及牡丹江中游。可见营养盐的评价结果与流域内的土地利用状况和人口分布存在着一定的关系。

在流域尺度上,土地利用制约着流域内的环境变化及资源利用^[32]。尽管自然条件对土地利用有一定的影响,但是人类活动毋庸置疑是土地利用的主导控制因素^[33]。松花江流域的土地利用类型具有明显的空间特征,主要以耕地和林地为主(图3)。将营养盐的评价结果对照土地利用图进行叠加,并结合现场调查情况,可以发现评价等级为极差和差的样点分布位置的主要土地利用类型为耕地,占比达87.69%,表明耕地的营养盐贡献量最高,农业非点源污染是流域内营养盐污染的主要形式,对于评价得分最低的TN更为明显(图4)。此外,大城市人口密集,周围样点的评价结果明显偏低。而分布在林地与草地样点的评价结果普遍较好,极好与好等级的样点中,93.75%的样点分布于此。总之,营养盐评价的结果与流域内的土地利用类型具有密切的关系。

2.2 营养盐污染评价结果

2.2.1 评价方法的可行性

松花江流域营养盐指标评价的调查样点分布于

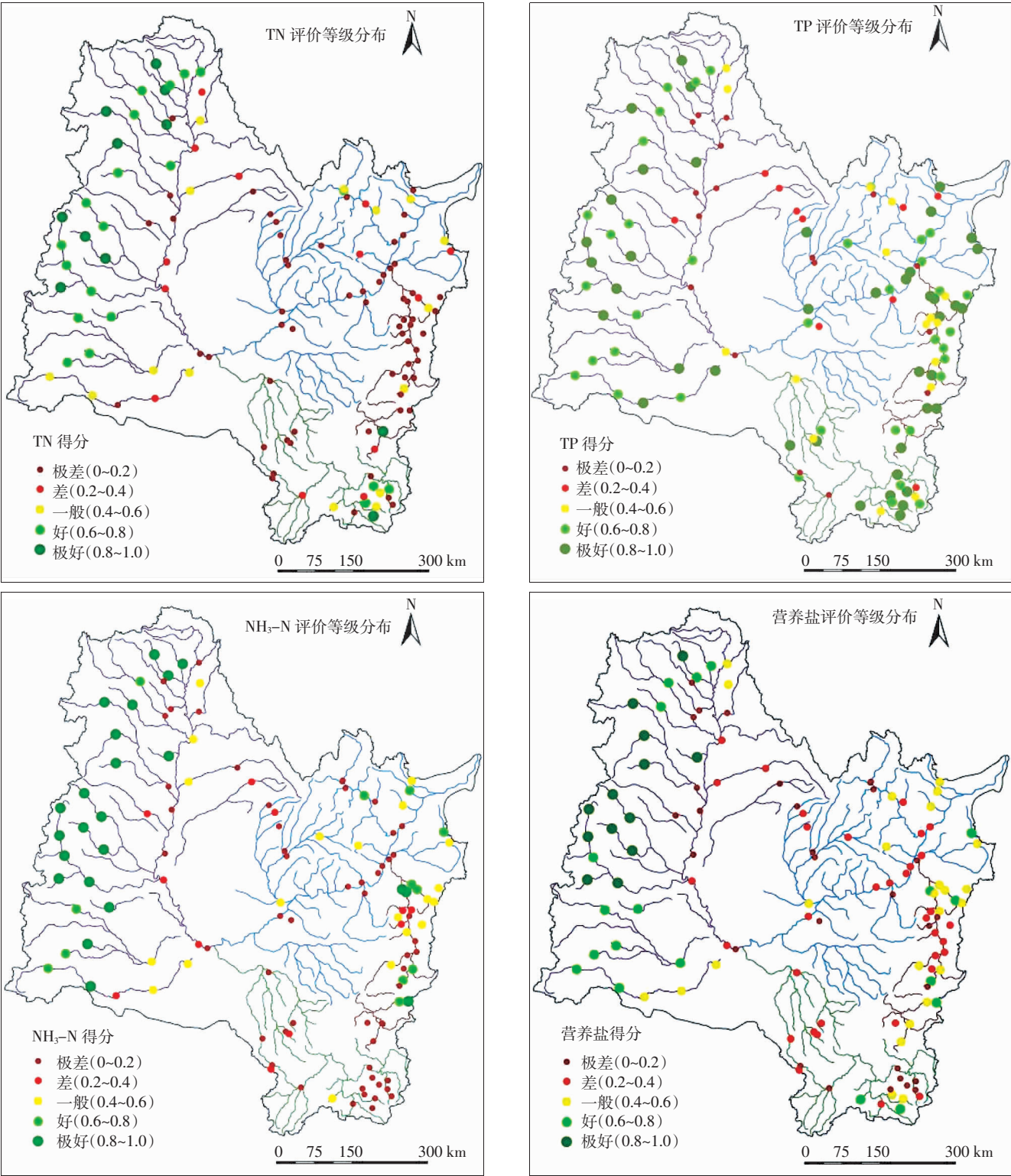


图 2 松花江流域营养盐评价等级空间分布

Figure 2 Spatial distribution of nutrient assessment grades in Songhua River Basin

整个流域内,包括各子流域的上、中、下游共 122 个。因此可对样点进行空间分布差异性分析来判别评价方法的可行性。对各样点的不同指标得分(TN、TP、NH₃-N 得分)进行方差分析(表 3),结果显示, $F_{\text{指标}}=$

95.133, $F_{\text{样点}}=2.497$, 显著水平均为 0.000 ($P<0.05$)。因此,松花江流域的 TN、TP 和 NH₃-N 的评价结果之间存在显著差异,不同样点营养盐指标之间的差异性也比较显著。可见不同营养盐指标采取同一方法进行

的比例达到了 51.6%,其中,营养盐评价得分为 0(即相应营养盐的浓度超过地表水Ⅳ类标准)的点位达到 46 个。与国内其他大流域的同期数据相比,松花江流域 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的含量较高,水生生物毒性风险较大(表 4)。这两种含氮的营养物质主要与化工废水造成的点源污染以及氮肥使用造成的非点源污染密切相关,表明松花江流域内的工业废水与农业废水均存在着不合理的排放。相比而言,TP 的评价呈现出较为满意的结果,超过 65%的点位处于极好和好的水平上,说明生活污水对松花江营养盐污染的贡献率要小于工业和农业废水。

2.2.3 各子流域营养盐评价结果

松花江流域四个主要的子流域营养盐评价结果如图 6 所示。评价结果表明,嫩江流域的营养盐评价结果好于其他地区,其中 TN、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和营养盐综合得分明显高于其他流域。这是由于嫩江流域的上游为大兴安岭山地林区,具有典型山溪型河流的特点,右岸为茂密的森林和草原区,自然生态环境良好,受人类

活动的影响相对较少。其他子流域的营养盐都存在不同程度的污染,其中营养盐综合评价得分处在差的水平上,富营养化的风险很大,随时会影响水生生物的种群结构^[34]。此外,松花江干流和第二松花江的中游都属于丘陵过渡带农业类型,并且是大型城市较为集中的区域,受此影响,这些地区的 TN 与 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的评价得分均处于较低的水平。

3 结论

(1)从营养盐的空间分布来看,松花江流域支流的评价结果总体好于干流。其中,嫩江干流、牡丹江干流、松嫩平原、三江平原和第二松花江流域的营养盐评价得分较低。各营养盐指标对生态风险影响程度从大到小顺序为 $\text{TN} > \text{NH}_3\text{-N} > \text{TP}$ 。

(2)对营养盐的污染评价的结果表明,松花江流域中约 53.28%的位点的营养盐处于差和极差的等级,污染情况较为严重,TN 和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的评价得分偏低。研究区域内主要子流域的营养盐污染程度排序为:松花江干流>第二松花江>牡丹江>嫩江,其中松花江干流与牡丹江的 TN、第二松花江 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的评价得分均处于极差的水平。

(3)研究所选取的营养盐指标之间的差异性以及不同样点之间的差异性显著,表明评价体系具有一定的科学性和普适性,可推广到其他流域。

(4)营养盐指标评价结果与流域土地利用类型的拟合度较高,与实际调查情况相符。其中,耕地对营养盐污染的贡献最大,尤其是农业上氮肥过度使用产生的非点源污染对含氮营养盐的影响最为明显。而土地利用与营养盐指标之间的定量关系还需进一步的研究。

表 4 我国主要流域氨氮含量变化($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)

Table 4 Changes of $\text{NH}_3\text{-N}$ contents in major drainage basins of China($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)

项目	含量 Contents	平均值 Mean
松花江 Songhua River	0.18~2.30	0.98
辽河 *Liaohe River	0.00~0.99	0.28
海河 *Haihe River	0.03~6.36	0.83
淮河 *Huaihe River	0.07~13.2	0.95
黄河 *Yellow River	0.04~4.79	0.71
长江 *Yangtze River	0.04~0.58	0.16

注:*数据来源:中国环境监测总站水质周报 2013 年第 26~29 期。

Note:*Data sources: Weekly report of water quality, section 26~29, 2013, CNEMC.

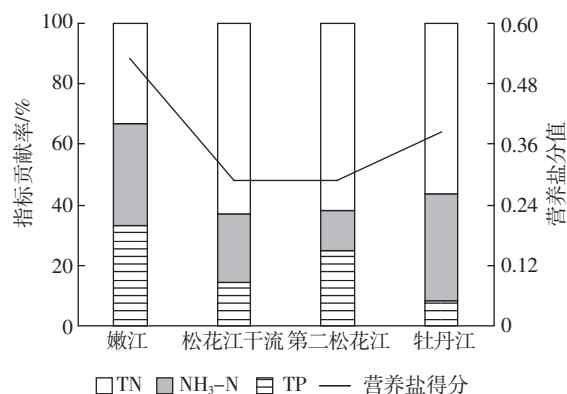


图 6 各子流域营养盐评价结果及各组贡献率

Figure 6 Contribution of each component to nutrient assessment in each sub-catchment

参考文献:

- [1] Moffat A S. Global nitrogen overload problem grows critical[J]. *Science*, 1998, 279:988-989.
- [2] Freedman B. Environmental ecology[M]. Sandiego: Academic Press, 2002:256-258.
- [3] 赵永宏, 邓祥征, 战金艳, 等. 我国湖泊富营养化防治与控制策略研究进展[J]. 环境科学与技术, 2010, 33(3):92-98.
ZHAO Yong-hong, DENG Xiang-zheng, ZHAN Jin-yan, et al. Progress on preventing and controlling strategies of lake eutrophication in China [J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, 33(3):92-98.
- [4] 陈美丹, 姚到琪, 徐爱兰. WASP 水质模型及其研究进展[J]. 水利科技与经济, 2006, 12(7):420-422, 426.
CHEN Mei-dan, YAO Dao-qi, XU Ai-lan. WASP water quality model and its advance in research[J]. *Water Conservancy Science and Technology and Economy*, 2006, 12(7):420-422, 426.

- [5] Yu S J. Generation of the data required by AGNPS[J]. *Journal of South-west Jiaotong University*, 2003, 11(1):53-57.
- [6] Gassman P W, Reyes M R, Green C H, et al. The soil and water assessment tool: Historical development, applications, and future research directions[J]. *Transactions of the ASABE*, 2007, 50(4): 1211-1250.
- [7] USDA. Hydrology national engineering handbook[M]. Washington DC: U S Govt Print Off, 1972: 127-133.
- [8] Caraco N F, Cole J J. Human impact on nitrate export: An analysis using major world rivers[J]. *Ambio*, 1999, 28(2): 167-170.
- [9] Smith S V, Swaney D P, Talaue M L. Humans, hydrology, and the distribution of inorganic nutrient loading to the ocean[J]. *Bioscience*, 2003, 53: 235-245.
- [10] Seitzinger S P, Kroeze C. Global distribution of nitrous oxide production and N inputs in freshwater and coastal marine ecosystems[J]. *Global Biogeochemistry Cycles*, 1998, 12: 93-113.
- [11] 赵亮, 魏浩, 冯士桢. 渤海氮磷营养盐的循环和收支[J]. 环境科学, 2002, 23(1): 78-81.
ZHAO Liang, WEI Hao, FENG Shi-zuo. Annual cycle and budgets of nutrients in the Bohai Sea[J]. *Environmental Science*, 2002, 23(1): 78-81.
- [12] Yan W J, Zhang S, Sun P, et al. How do nitrogen inputs to the Changjiang basin impact the Changjiang River nitrate[J]. *Global Biogeochemistry Cycles*, 2003, 17(4): 1091.
- [13] 詹旭, 邹路易. 湖泊水体中营养盐控制技术进展[J]. 环境科技, 2009, 22(4): 60-64.
ZHAN Xu, ZOU Lu-yi. Study advances on technology of nutrient control in lake water body[J]. *Environmental Science and Technology*, 2009, 22(4): 60-64.
- [14] 黄文钰, 吴延根, 舒金华. 中国主要湖泊水库的水环境问题与防治建议[J]. 湖泊科学, 1998, 10(3): 83-88.
HUANG Wen-yu, WU Yan-gen, SHU Jin-hua. Hydrographical environmental problems and countermeasures of main lakes and reservoirs in China[J]. *Journal of Lake Sciences*, 1998, 10(3): 83-88.
- [15] 秦伯强. 长江中下游浅水湖泊富营养化发生机制与控制途径初探[J]. 湖泊科学, 2002, 14(3): 193-202.
QIN Bo-qiang. Approaches to mechanisms and control of eutrophication of shallow lakes in the middle and lower reaches of the Yangtze River[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2002, 14(3): 193-202.
- [16] 陈静生, 于涛. 黄河流域氮素流失模数研究[J]. 农业环境科学学报, 2004, 23(5): 833-838.
CHEN Jing-sheng, YU Tao. Characteristics of nitrogen loss modulus in the Yellow River Basin[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2004, 23(5): 833-838.
- [17] Chen J S, Gao X M, He D W, et al. Nitrogen contamination in the Yangtze River system, China[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2000, 73(2): 107-113.
- [18] Zhang J. Chemical trend of national rivers in China: Huanghe and Changjiang[J]. *Ambio*, 1995, 24: 274-278.
- [19] 国家环境保护总局. HJ/T 91—2002 地表水和污水监测技术规范[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
State Environmental Protection Administration. HJ/T 91—2002 Surface water and wastewater monitoring technical specifications[S]. Beijing: Chinese Environmental Press, 2002.
- [20] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. 四版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002: 200-364.
State Environmental Protection Administration. Methods for monitoring and analysis of water and wastewater[M]. 4th Edition. Beijing: Chinese Environmental Science Press, 2002: 200-364.
- [21] Fox P J, Naura M, Scarlett P. An account of the derivation and testing of a standard field method, river habitat survey[J]. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 1998, 8(4): 455-475.
- [22] Carlson T N, Haase A T, Cudaback C N, et al. Assessing stream health in the Chesapeake Basin using the SHARP model[J]. *Open Journal of Modern Hydrology*, 2012(2): 71-78.
- [23] Hellawell J M. Biological indicators of freshwater pollution and environmental management[M]. London: Elsevier Applied Science Publishers, 1986: 435-446.
- [24] Bond N R, Liu W, Weng S C, et al. Assessment of river health in the Pearl River Basin (Gui sub-catchment)[C]//River Health and Environmental Flow in China Project. Brisbane: Pearl River Water Resources Commission and International Water Centre, 2011: 111-115.
- [25] Australia—China Environment Development Partnership (ACEDP). Taizi River health report card[R]. Beijing: Chinese Research Academy of Environmental Science, 2012: 33-45.
- [26] 国家环境保护总局. GB 3838—2002 地表水环境质量标准[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
State Environmental Protection Administration. GB 3838—2002 Standards for surface water quality[S]. Beijing: Chinese Environmental Science Press, 2002.
- [27] 陆卫军, 张涛. 几种河流水质评价方法的比较分析[J]. 环境科学与管理, 2009, 34(6): 174-176.
LU Wei-jun, ZHANG Tao. Comparison and analysis of several appraisal methods for river water quality[J]. *Environmental Science and Management*, 2009, 34(6): 174-176.
- [28] 彭文启, 张祥伟. 现代水环境质量评价理论和方法[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005: 151-153.
PENG Wen-qi, ZHANG Xiang-wei. Modern water environmental quality assessment theory and methods[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005: 151-153.
- [29] Emerson K, Russo R C, Lund R E, et al. Aqueous ammonia equilibrium calculations: Effect of pH and temperature[J]. *Journal of the Fisheries Research Board of Canada*, 1975, 32(12): 2379-2383.
- [30] Erickson R J. An evaluation of mathematical models for the effects of pH and temperature on ammonia toxicity to aquatic organisms[J]. *Water Research*, 1985, 19(8): 1047-1058.
- [31] 张力, 徐志金, 滕志坤. 松花江流域面源污染特征与防治对策[J]. 环境科学与管理, 2008, 33(7): 55-61.
ZHANG Li, XU Zhi-jin, TENG Zhi-kun. Songhua River Basin characteristics and non-point source pollution control measures[J]. *Environmental Science and Management*, 2008, 33(7): 55-61.
- [32] Bhaduri B, Harbor J, Engel B, et al. Assessing watershed-scale, long-term hydrologic impacts of land-use change using a GIS-NPS model[J]. *Environmental Management*, 2000, 26(6): 643-658.
- [33] Serra P, Pons X, Sauri D. Land-cover and land-use change in a Mediterranean landscape: A spatial analysis of driving forces integrating biophysical and human factors[J]. *Applied Geography*, 2008, 28(3): 189-209.
- [34] 周启星. 从第二届世界水资源论坛看辽宁的水资源危机及对策[J]. 生态学杂志, 2002, 21(2): 36-39.
ZHOU Qi-xing. New cognition and solution of water resource crisis in Liaoning Province based on the 2nd World Water Forum[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2002, 21(2): 36-39.