

辽河流域水质状况及其对土地利用/覆被变化的响应

李艳利^{1,2}, 徐宗学¹, 李艳粉³, 李磊¹

(1. 北京师范大学 水科学研究院 水沙科学教育部重点实验室, 北京 100875;

2. 河南理工大学 资源环境学院, 河南 焦作 454000; 3. 焦作大学 化工与环境工程学院, 河南 焦作 454000)

摘要: 为了分析辽河流域水环境物理化学变量与土地利用变化的关系, 于 2009 年 8 月和 2010 年 6 月, 对辽河流域内 80 个点位的水环境物理化学特征进行了调查, 并对其理化指标进行了综合评价。结果表明, 浑河和太子河上游区域水体污染较小, 中下游区域水体指标大多为 V 类和劣 V 类; 西拉木伦河和老哈河在水域的西北方, 水质总体评价为 IV—V 类, 水质情况较差; 东辽河流域区域特征不明显, 2009 年大部分水体指标为劣 V 类, 2010 年大部分水体指标为 III 到劣 V 类; 西辽河流域内大部分河段长期干涸; 大辽河流域的地理位置位于整个流域的中东部, 水体各项指标大多为 V 类和劣 V 类。相关分析和回归分析表明流域尺度上林地和农田对水体水质参数的浓度影响最大, 是影响化学需氧量(COD_{Mn})、含沙量、总氮和电导率(EC)浓度的主要土地利用类型。草地对 2009 年水质的综合评价结果具有显著正效应。

关键词: 水质; 土地利用/覆被变化; 辽河; 理化参数

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2013)02-0072-06

中图分类号: X522

Water Quality in Liaohe River Basin and Its Response to Land Use and Land Cover Change

LI Yan-li^{1,2}, XU Zong-xue¹, LI Yan-fen³, LI Lei¹

(1. Key Laboratory of Water and Sediment Sciences, Ministry of Education, College of Water Sciences, Beijing

Normal University, Beijing 100875, China; 2. Institute of Resources & Environment, He'nan Polytechnic University, Jiaozuo, He'nan 454000, China; 3. Institute of Chemical and Environment Engineering, Jiaozuo College, Jiaozuo, He'nan 454000, China)

Abstract: A total of 80 sampling sites were selected in the Liaohe River basin. During the period of 2009—2010, physical-chemical variables were analyzed to facilitate comprehensive water quality assessment and in particular to address its relationship with land use/cover. The results indicated that physical and chemical properties showed apparent spatial heterogeneity in the basin. As located in the southeast, little pollution was imposed on Taizihe River and Hunhe River, where water quality in downstream reaching level of V or slightly lower than V. Xilamulunhe River and Laohahe River, located in the northwest of the basin, had water quality ranging between IV and V. There were no obvious features in the East Liaohe River basin, where water quality in downstream was classified as worse than V level in 2009 and was ranging between III and V in 2010. The majority of West Liaohe River was dry for many years. Big Liaohe River basin was located in middle and eastern, with water quality varied around V. Correlation and regression analysis indicated that forest and agriculture were the major land use types in the watershed scale affecting water quality variables including COD_{Mn}, sediment, conductivity and TN. Grassland showed positive effect significantly on the comprehensive water quality in 2009.

Keywords: water quality; land use and land cover change; Liaohe River; physical-chemical features

近年来,土地利用变化的生态环境效应研究逐步得到加强,水生态效应的研究成为土地利用变化引起的环境效应的一个重要组成部分。伴随着水资源问题成为许多国家和地区社会发展的重要制约因

素,土地利用变化对水质、水量的影响及水资源可持续发展利用已成为该领域的重要研究课题^[1-12]。以往的研究主要集中在水质变量例如溶解盐、悬浮固体、营养盐的研究^[13-17]。主要结论为农业土地利用的

收稿日期:2012-02-22

修回日期:2012-05-20

资助项目:国家自然科学基金项目“库滨带生态水文过程与非点源氮素动态响应机制研究”(40901280)

作者简介:李艳利(1979—),女(汉族),河南省焦作市人,讲师,博士研究生,主要研究方向为生态水文。E-mail:yll@mail.bnu.edu.cn.

通信作者:徐宗学(1962—),男(汉族),山东省淄博市人,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为生态水文。E-mail:zxu@bnu.edu.cn.

增加会增加营养元素如氮、磷及悬浮物的入河通量,造成水体富营养化和水污染,城市土地利用也对河流中的溶解盐有较大的影响。

流域代表了水与自然特征、水土资源利用相关的物质迁移的自然空间综合体,因而是与水相关的区域尺度研究的最佳单元。流域水生态系统的水化学性质受许多自然和人为因素所影响,其对水化学的影响机制不同。流域特征包括地形和地表地质也能影响到地表水的水质,由于不可持续的土地利用方式,导致淡水的水质和水量显著下降和减小。本研究以流域为尺度,基于辽河流域水生态二级分区对流域水环境质量进行综合评价和土地利用结构进行分析,然后对辽河流域土地利用对水质的影响进行研究,首先利用 GIS 水文分析功能对辽河流域进行子流域划分,运用 SPSS 18.0 软件对多个子流域的水质指标与土地利用类型进行相关性分析和回归分析,分别得出 Spearman 相关系数和回归方程,最终揭示流域水质与土地利用类型之间的关系,以期更好地为该流域的规划建设提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

辽河流域位于我国北部,横跨吉林、辽宁、河北省和内蒙古自治区的部分城市共计 4 省(区),16 市(地、盟)和 65 个县(旗)。地理位置处于东经 $116^{\circ}30'$ — $125^{\circ}47'$,北纬 $38^{\circ}43'$ — 45° ,北与松花江流域接壤,南与渤海湾相接,流域面积 $2.19 \times 10^5 \text{ km}^2$,南北长约 706 km,东西宽约 490 km。属温带、暖温带半湿润大陆性季风气候。辽河流域年平均气温为 $4 \sim 9^{\circ}\text{C}$,7 月份最高,平均在 $20 \sim 30^{\circ}\text{C}$,1 月份最低,平均在 $-10 \sim -18^{\circ}\text{C}$ 。年降水量为 $350 \sim 1\,000 \text{ mm}$,多集中在 6—9 月份,占年降水量的 70% 以上,降水自东向西递减。流域内由 2 个独立水系所组成:一为东、西辽河,于福德店汇流后为辽河干流,经双台子河由盘山入海,全长 1 394 km,其中干流长 516 km;另一为浑河、太子河于三岔河汇合后经大辽河由营口入海,全长 415.4 km,其中大辽河长 94 km,近些年西辽河段持续干旱,部分河流出现断流,一些河流区段甚至断流长达 10 a。

1.2 数据资料

1.2.1 水质数据 2009 年 8 月和 2010 年 6 月,对辽河流域内 80 个点位的化学特征、水环境物理特征和水生生物特征进行了调查。由于辽河干流内蒙古境内河段常年处于断流状态,因此,2009 年实际采得水样 43 个,2010 年实际采得水样 58 个。总

体上,辽河采样的布点原则是主要干流和支流都有 1~2 个代表性点位,干流上点位间距约 30 km。

以 pH-B-1 型酸度计和 YSI-85-25 型便携式多功能水质分析仪对 pH 值、水温、溶氧、电导率进行现场测定;参照中华人民共和国国家标准—地面水环境质量标准 (GHZBI—121999),对 $\text{NH}_3\text{—N}$, TN, TP, COD_{Mn} 和悬浮物含量等项目进行测定。坐标、海拔高度用 GPS 现场测量。

1.2.2 土地利用数据 选取了 2007 年的 Landsat TM 15 景图像进行遥感解译。在遵循全国《土地利用现状调查技术规程》的要求下,确定 6 个一级土地利用类型:农田、林地、草地、水域、城乡居民地和未利用土地。基于辽河流域水生态二级分区,统计各水生态区的土地利用分布情况。基于数字化建立辽河流域数字地形 (DEM) 和水系分布图,利用 ArcGIS 的水文分析模块以各监测断面为流域出口点进行子流域划分,得到 102 个子流域。考虑到其中的采样点落在子流域的位置和子流域的面积大小,进一步统计了 24 个子流域的土地利用数据。

1.3 研究方法

1.3.1 辽河流域二级水生态功能区划分 根据土地利用面积比例和降水量等因素将辽河流域划分为 8 个水生态二级区。命名在一级分区基础上添加序号如 I_1 和 I_2 分别表示水生态一级区内的第 1, 2 个水生态二级区。总体来看,辽河流域西部、中部水生态二级区面积较东部要大,这是因为前两者,尤其是中部的环境要素(如降水、高程和土地利用等)空间上变化较小,而辽河流域东部的水系分布更为密集,水资源丰沛而空间差异较大。

1.3.2 水质综合评价 选择 COD_{Mn} , TN, TP 和 $\text{NH}_3\text{—N}$ 作为评价指标,对于某一采样点,其水质类别计算方法如下,设 x_j 为某一采样指标值, $S = \{S_i | i = 1, \dots, 5\}$ 为该指标在《地表水环境质量标准 GB3838—2002》中各水质类别的标准限制。根据传统分类方法确定 x_j 的水质类别 i , 则其模糊分类为:

$$C_{x_j} = i + \frac{x_j - s_i}{s_{i+1} - s_i} \quad (1)$$

式中: C_{x_j} ——采样点 x_j 指标的水质类别。该采样点的综合水质分类为

$$C_x = \text{ceil} \left[\sum_{j=1}^m \frac{C_{x_j}}{m} \right] \quad (2)$$

式中: C_x ——采样点得水质类别; ceil——向上取整。

统计各采样点分布比较密集的 4 个水生态二级区 ($\text{III}_1, \text{III}_2, \text{IV}_1, \text{IV}_2$) 和各子流域内所有监测断面的年度水质等级均值 (I—V 类水分别以数值 1~5 进

行计算,劣 V 类水的水质等级以 6 来计算)。

1.3.3 统计分析 运用 SPSS 16.0 软件,对辽河流域 2009 和 2010 年度各子流域水质等级与土地利用面积比作相关性分析,以分析土地利用类型对水质状况的影响。以 2009 和 2010 年度各子流域各水质指标浓度的平均值为因变量,应用多元回归法研究对各种水质影响最显著地土地利用类型。

2 结果分析

2.1 土地利用/覆被分布

辽河流域 8 个水生态二级区的土地利用情况详见表 1。其中 III₁ 和 IV₁ 区耕地面积比例均在 50% 以上, IV₂ 区林地面积占 78.95%, 集中分布在太子河流域的东南部。I 区和 II 区草地面积比例均在 25% 以上。III₁, III₂ 和 IV₁ 区建设用地面积比例相对较高,尤其是 IV₁ 区建设用地比例达 16.19%。

表 1 基于二级水生态分区的辽河流域土地利用比例

水生态二级区	农田	林地	草地	水域	城乡居民用地	未利用地
I ₁	21.59	24.35	41.18	4.43	1.49	6.96
I ₂	17.13	25.92	46.61	1.89	1.39	7.07
I ₃	39.40	29.21	25.57	1.75	3.75	0.31
II ₁	32.17	7.31	33.39	7.02	2.61	17.50
III ₁	64.15	12.40	7.13	6.95	7.01	2.36
III ₂	6.20	25.76	1.36	2.68	6.88	1.38
IV ₁	59.64	17.56	0.84	5.73	16.19	0.03
IV ₂	16.37	78.95	0.20	1.87	2.60	0

2.2 辽河流域水质的综合评价

辽河流域按地理位置可分为东辽河、西辽河、辽河、太子河、浑河、西拉木伦河及老哈河,可通过对其主要水质指标进行空间分布特征分析。比较各水生态区水质等级,发现水质状况最好的是 2010 年监测的 2 个水生态二级区同时也是林地面积比例最高的,即 III₂ 和 IV₂ 区。2009 年度所有二级水生态区的水质等级都劣于 V 类。

2009 年 8 月和 2010 年 6 月水质采样的综合评价结果分别如图 1—2 所示。2009 年采样中 IV 类水质的采样点只有 2 个; V 类和劣 V 类水质分别为 6 个和 35 个,整个流域劣 V 类水质采样点超过了 80%。其中 III 区和 IV 区几乎全部为劣 V 类水质。2010 年采样中 III 类水质采样点有 5 个, IV 类 8 个, V 类水质采样点有 19 个,劣 V 类水质采样点有 26 个, V 类和劣 V 类水质分别占 32.76% 和 44.83%。此次采样的劣 V 类水质主要还是分布在 III 区和 IV 区。III—II 区和 IV 区的劣 V 类水质采样点分别有 5 个和 11 个。因此,总的看来,辽河流域这几个水生态二级分区中没有水

在分析的 24 个子流域中,林地、农田、水域是主要的景观类型,林地在各子流域的百分比是从 13.95% (太子河上游) 到 82.07% (大辽河下游),主要分布在太子河中下游地区、老哈河上游地区、东辽河的中下游以及西辽河的下游地区。水域也是主要的景观类型,其百分比从 84.15% (太子河上游) 到 0.58% (太子河下游),主要分布在太子河上游,细河、西拉木伦河上游、浑河上游区域。具有采样点的 24 个子流域中,其中林地面积占 50% 以上的有 12 个,水域面积占 50% 以上的有 10 个。流域中草地面积普遍较小,草地面积最大的子流域位于西拉木伦河上游地区,占 16.76%,各子流域耕地面积所占百分比从 17.48% (西拉木伦河上游地区) 到 0.33% (细河),城乡居民用地比例从 5.79% (大辽河下游) 到 0.47% (海城河),未利用土地面积比例最大的为 1.61%,位于英金河,大部分子流域的未利用土地比例接近或等于零。

质较好的区域。其中 IV—I 和 IV₂ 区水质很差。结合 8 个水生态二级区的土地利用情况,可以看出农田和建设用地分布较高的 III₁, III₂ 和 IV₁ 区水质的综合评价结果较差(表 2)。



图 1 辽河流域 2009 年 8 月采样水质综合评价结果

总体来看,辽河流域源头部分水域受到人为污染较小,水质良好,但在中下游人为影响较重的区域,水质严重下降,污染较重,辽河流域是辽宁省重要的工

业基地, COD 和氨氮是地表水中的两种主要污染物, 也是污染控制的主要指标, 研究该地区河流污染物变化情况具有重要的现实意义。

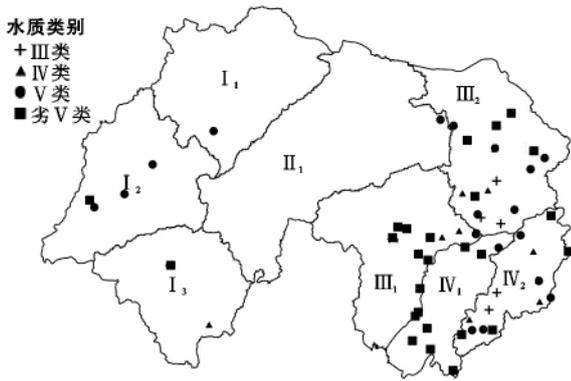


图 2 辽河流域 2010 年 6 月采样水质综合评价结果

表 2 辽河流域二级水生态区水质等级

二级水生态分区	水质等级均值	
	2009 年	2010 年
III ₁	5.43	5.58
III ₂	5.90	4.88
IV ₁	5.80	5.86
IV ₂	6.00	4.79

2.3 水质对土地利用数量结构的响应

对各子流域水质等级与相应的土地利用构成进行相关性分析(表 3), 发现农田和建设用地的面积比例与水质等级正相关关系, 林地和草地的面积比例与水质等级之间存在负相关关系, 且草地面积比与水质等级表现出显著性, 说明草地用地比例对整体水质状况有显著地正效应。

表 3 辽河流域土地利用方式与水质等级的相关性

年份	耕地		林地		草地		建设用地	
	相关系数	显著性	相关系数	显著性	相关系数	显著性	相关系数	显著性
2009 年水质等级	0.222	0.348	-0.307	0.188	-0.478 ^a	0.033	0.163	0.492
2010 年水质等级	0.297	0.168	-0.313	0.146	-0.057	0.797	0.055	0.803

注: 上标 a 表示在 0.05 水平显著相关(双尾), b 表示在 0.01 水平显著相关(双尾)。下同。

由水质参数和各土地利用类型面积百分比做相关分析和回归分析可知(表 4—5), 林地和 COD_{Mn}、含沙量和总氮呈显著负相关($p < 0.01$), 林地与电导率(EC)呈显著正相关($p < 0.05$); 草地和硝酸盐(NO₃⁻-N)呈极显著正相关($p < 0.01$), 草地和含沙量呈显著负相关($p < 0.05$); 农田和 COD_{Mn}、含沙量、栖息地评分、电导率、总氮极显著相关($p < 0.01$), 农田和硝酸盐和氨氮含量呈显著相关($p < 0.05$), 其中农田和栖息地评分、硝酸盐含量呈负相关; 城乡居民用地与水质参数没有表现出显著相关性, 但对于表示有机污染的 TN, TP 和 NH₃-N 都表现出正相关关系。说明在流域水平, 林地和草地相对面积增加对水质改善发挥积极作用, 农田和城乡居民用地相对面积的增加则使

水质趋于恶化。通过多元回归分析表明, COD_{Mn}、电导率分别可用林地、水域的面积比来估计, 但 TN 和硝酸盐可以采用多种土地利用面积比来估计, TN 可以用草地、农田的比例来表示, 硝酸盐可以用草地和农田的用地比例来预测。

表 4 辽河流域水质参数和土地利用类型的相关系数

项目	林地	草地	农田	建设用地
COD _{Mn}	-0.836 ^b	0.279	0.698 ^b	0.186
含沙量	-0.745 ^b	-0.468 ^a	0.653 ^b	0.254
EC	-0.804 ^b	0.344	0.659 ^b	0.237
TP	-0.141	-0.118	0.253	0.383
TN	-0.471 ^a	-0.361	0.605 ^b	0.016
NO ₃ -N	0.327	0.648 ^b	-0.500 ^a	-0.062
NH ₃ -N	-0.341	-0.091	0.472 ^a	0.259

表 5 辽河流域水质参数和土地利用类型的回归模型

理化指标	自变量(面积比例)	回归方程	R ²	调整 R ²	p
COD _{Mn}	林地	0.663 林 + 2.350	0.439	0.414	0.000
TN	草地, 农地	-0.027 草 + 0.032 农 + 0.101	0.548 ^b	0.505 ^b	0.004
EC	水域	-5.501 水 + 680.887	0.455 ^b	0.430 ^b	0.000
NO ₃ ⁻ -N	草地, 农地	0.016 草 - 0.016 农 + 0.364	0.560 ^b	0.518 ^b	0.003

3 结果讨论

土地利用是人类活动在空间上的综合反映, 土地

利用从两方面作用于河流水环境质量。一方面不同人类活动方式和强度会影响营养盐进入水体的输入量, 另一方面通过土地利用方式改变地表粗糙度从而

会影响地表径流过程和营养盐进入水体的过程。已有研究表明,总氮和总磷的比率在林地径流中最高,农田次之,城市中最少。一般而言,农业、城市等用地比例越大,河流营养盐的浓度越高,农业流域营养盐的径流输出负荷远远高于林地流域^[18-19]。城市化地区的溪流中硝酸盐含量会升高^[20-21]。

本研究从流域尺度上来分析水体的理化性质和土地利用的关系,研究结果表明,林地对水质表现出显著地正效应。在流域尺度上林地与总氮、总磷、含沙量以及氨氮都表现出负相关关系,与硝酸盐存在正相关关系,表明随着林地所占比例增大水体质量也越好,林地与总氮、COD_{Mn}、含沙量和电导率表现出显著负相关,表明林地对这些污染物具有明显的削减作用。可能由于浑太河流域的林地大多是天然林和次生林,且这些林地在采样期(9月)处于生长旺盛期,因此对携带营养物质的地表径流具有很强的拦截作用,也可理解为林地较低的水土流失率可降低营养物质进入河流。

农田与总氮、COD_{Mn}、含沙量、氨氮和电导率均呈现正相关关系,与硝酸盐呈现负相关关系,农田对水质表现出显著地负效应,可能是由于东北在5—9月是以大豆、玉米、高粱等农作物为主,当地农户在作物生长的关键期(6月)大量追肥^[22],加之2a的采样期均在汛期,降雨量明显偏高,在雨水的冲刷下,土壤肥料大量流失,所以农田对水质有负面影响,也可以理解为这些营养物质主要来源于农业施肥过程中暴露于土壤表面的营养物质。

草地对水质含沙量有显著正效应,对硝酸盐有显著负效应,说明草地可有截留径流中携带的颗粒物;建设用地对水质具有负效应,但相关程度不显著。由于建设用地上承载高密度人口和经济活动,污染物排放强度高,并且以不透水地面为主的建设用地被认为对地表径流有促进作用,都可能增加附近河流中营养盐浓度。

在多元回归方程中,COD_{Mn}与林地、农田都具有很强的相关性,反映了农田和林地是水体有机污染物的主要来源,硝酸盐、含沙量与草地和农田具有极强的相关性,反映了草地和农田是水体硝酸盐和含沙量的主要来源。电导率可用水域用地比例来估计,说明水域用地比例的大小对电导率的浓度变化有决定性影响。

影响水质的主要因素是土地利用变化导致的面源污染,其中地表径流是土壤中氮、磷进入水体的主要途径。在不同的流域尺度上,水质参数和土地利用类型之间的关系是不同的^[23-24],不同的时间尺度上的

水质变量也会增加这种不确定性。但通过对水质变量和土地利用的相关性可以获得土地利用对水质影响的一些信息,从分析的结果可以获得影响水质变化的土地利用类型,且在不同时空阶段的水质的污染源和受污染的地区,这些结论对于水质保护、污水处理厂的建设和植被恢复都具有一定的指导意义。河流的水质变化是一个非常复杂的过程,除了土地利用,来水量的大小、河流两岸工农业污水的汇入等点源污染都是非常重要的影响因素,本研究希望从定性上把握土地利用对河流水质的影响。

4 结论

(1) 辽河流域的水体理化性质呈现明显的地理分区性,太子河和浑河的水体理化特征为:上游区域水体污染较小,但中下游区域水体指标大多为Ⅴ类和劣Ⅴ类水;西拉木伦河和老哈河的水质总体评价在Ⅳ—Ⅴ类,水质情况较差;东辽河流域没有明显的规律,大部分水体指标为劣Ⅴ类;西辽河流域内大部分为干涸水体;大辽河流域的地理位置位于整个流域的中东部,水体各项指标大多为Ⅴ类和劣Ⅴ类。结合8个水生态二级区的土地利用情况,可以看出耕地和建设用地分布较高的Ⅲ₁、Ⅲ₂和Ⅳ₁区水质的综合评价结果较差。初步断定耕地和建设用地对水质的影响较大。

(2) 农田和建设用地的面积比例与水质等级正相关,林地和草地的面积比例与水质等级之间存在负相关,且草地面积比与水质等级表现出显著性,说明草地用地比例对整体水质状况有显著地正效应。

(3) 林地对水质表现出显著地正效应,在流域尺度上林地与总氮、总磷、含沙量以及氨氮都表现出负相关关系,与硝酸盐存在正相关关系;农田与总氮、COD_{Mn}、含沙量、氨氮和电导率均呈现正相关关系,与硝酸盐呈现负相关关系,农田对水质表现出显著地负效应;草地对水质含沙量有显著正效应,对硝酸盐有显著负效应;建设用地对水质具有负效应,但相关程度不显著。

(4) COD_{Mn}与林地、农田都具有很强的相关性,反映了农田和林地是水体有机污染物的主要来源,硝酸盐、含沙量与草地和农田具有极强的相关性,反映了草地和农田是水体硝酸盐和含沙量的主要来源。电导率可用水域用地比例来估计,说明水域用地比例的大小对电导率的浓度变化有决定性影响。

(5) 河岸土地利用对水质的影响以及缓冲区景观和水质的关系将是今后的研究方向。农业的发展和城市化进程的加快以及人口的增加对土地的利用

都将势必进一步导致水质下降,全球气候变化,使温度和蒸发升高,降水减少,以及高频率的洪水和生物化学循环使得土壤侵蚀加速,都将进一步加速水质的变化,所以应该加强流域上游缓冲区的管理,且在城市和农村地区应该重新修订准排入河流的废水总量。

[参 考 文 献]

- [1] 王晓燕,王一响,王晓峰,等. 密云水库小流域土地利用方式与氮磷流失规律[J]. 环境科学研究,2003,16(1):30-33.
- [2] 李燕,李恒鹏. 太湖上游流域下垫面因素对面源污染物输出强度的影响[J]. 环境科学,2008,29(5):1319-1324.
- [3] 郭春霞. 平原河网地区农村面源污染重点源和区的识别筛选:以上海青浦区为例[J]. 农业环境科学学报,2011,30(8):1652-1659.
- [4] 唐艳凌,章光新. 流域单元景观格局与农业非点源污染的关系[J]. 生态学杂志,2009,28(4):740-746.
- [5] 周林飞,郝利朋,孙中华. 辽宁浑河流域不同土地类型地表径流和壤中流氮、磷流失特征[J]. 生态环境学报,2011,20(4):737-742.
- [6] 郎海鸥,王文杰,王维,等. 基于土地利用变化的小江流域非点源污染特征[J]. 环境科学研究,2010,23(9):1158-1166.
- [7] 岳隽,王仰麟,李贵才,等. 不同尺度景观空间分异特征对水体质量的影响[J]. 生态学报,2007,27(12):5272-5280.
- [8] 罗璇,史志华,尹炜,等. 小流域土地利用结构对氮素输出的影响[J]. 环境科学,2010,31(1):59-62.
- [9] 黄金良,李青生,洪华生,等. 九龙江流域土地利用/景观格局—水质的初步关联分析[J]. 环境科学,2011,32(1):64-72.
- [10] Ahearn D S, Sheibley R S, Dahlgren R A, et al. Land use and land cover influence on water quality in the last free-flowing river draining the western Sierra Nevada, California[J]. Journal of Hydrology, 2005, 313(3/4): 234-247.
- [11] Sliva L, Williams D D. Buffer zone versus whole catchment approaches to studying land use impact on river water quality [J]. Water Research, 2001, 35(14): 3462-3472.
- [12] Ngoye E, Machiwa J F. The influence of land use patterns in the Ruvu river watershed on water quality in the river system [J]. Physics and Chemistry of the Earth, 2004, 29(15/18):1161-1166.
- [13] Hill A R. Stream phosphorus exports from watersheds with contrasting land uses in Southern Ontario [J]. Water Resources Bulletin, 1981, 17(4):627-634.
- [14] Allan J D, Erickson D L, Fay J. The influence of catchment land use on stream integrity across multiple spatial scales [J]. Freshwater Biology, 1997, 37(1): 149-161.
- [15] Johnson L B, Richards C, Host G E, et al. Landscape influences on water chemistry in Midwestern stream ecosystems [J]. Freshwater Biology, 1997, 37(1):193-208.
- [16] Osborne L L, Wiley M J. Empirical relationships between land-use cover and stream water-quality in an agricultural watershed [J]. Journal of Environmental Management, 1988, 26(2):9-27.
- [17] Smart R P, Soulsby C, Neal C, et al. Factors regulating the spatial and temporal distribution of solute concentrations in a major river system in NE Scotland [J]. The Science of the Total Environment, 1998, 221(2/3):93-110.
- [18] 刘星才. 辽河流域水生生态分区及其水环境特征分析 [D]. 北京:北京师范大学, 2011.
- [19] 胡建林,刘国祥,蔡庆华,等. 三峡库区重庆段主要支流春季浮游植物调查 [J]. 水生生物学报,2006, 30(1): 116-119.
- [20] 张殷俊,陈爽,相景昌. 河流近域土地利用格局与水质相关性分析:以巢湖流域为例 [J]. 长江流域资源与环境,2011,20(9):1054-1060.
- [21] Sliva L, Williams D D. Buffer zone versus whole catchment approaches to studying land use impact on river water quality [J]. Water Research, 2001, 35(14): 3462-3472.
- [22] Turner R E, Rabalais N. Linking landscape and water quality in the Mississippi River Basin for 200 years [J]. Bioscience, 2003,53(6):563-572.
- [23] 田宇鸣,李新. 土地利用/覆被变化(LUCC)研究综述 [J]. 环境科学与管理,2006,31(5):60-64.
- [24] 赵米金,徐涛. 土地利用/土地覆被变化环境效应研究 [J]. 水土保持研究,2005,12(1):43-46.