

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第3期

Vol.35 No.3

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

青岛近海生物气溶胶中可培养微生物浓度及群落多样性的季节变化	祁建华, 武丽娟, 高冬梅, 金川 (801)
基于重庆本地碳成分谱的 PM _{2.5} 碳组分来源分析	张灿, 周志恩, 翟崇治, 白志鹏, 陈刚才, 姬亚芹, 任丽红, 方维凯 (810)
重庆市北碚城区大气污染物浓度变化特征观测研究	徐鹏, 郝庆菊, 吉东生, 张军科, 刘子锐, 胡波, 王跃思, 江长胜 (820)
基于气溶胶光学特性垂直分布的一次浮尘过程分析	王苑, 邓军英, 史兰红, 陈勇航, 张强, 王胜, 徐婷婷 (830)
基于悬铃木叶片重金属累积特性的大气污染分析和评价	刘玲, 方炎明, 王顺昌, 谢影, 汪承润 (839)
典型染整企业定型机废气排放特征及潜在环境危害浅析	徐志荣, 王鹏, 王浙明, 许明珠, 吴剑波, 李嫣 (847)
火电厂大气污染物排放标准实施效果的数值模拟研究	王占山, 潘丽波 (853)
国IV天然气公交车实际道路颗粒物排放特性	楼狄明, 成伟, 冯谦 (864)
稻草和玉米秸秆烟尘中的正构脂肪醇	刘刚, 李久海, 吴丹, 徐慧 (870)
河口湿地近地面大气 CO ₂ 浓度日变化和季节变化	张林海, 仝川, 曾从盛 (879)
三峡库区库中干流及支流水体夏季二氧化碳分压及扩散通量	李双, 王雨春, 操满, 钱慧君, 许涛, 周子然, 邓兵, 汪福顺 (885)
施用畜禽粪便堆肥的蔬菜地 CH ₄ 、N ₂ O 和 NH ₃ 排放特征	万合峰, 赵晨阳, 钟佳, 葛振, 魏源送, 郑嘉熹, 郭玉龙, 韩圣慧, 郑博福, 李洪枚 (892)
干湿交替条件下不同晶型铁氧化物对水稻土甲烷排放的影响	张天娇, 汤佳, 庄莉, 熊格生, 刘志, 周顺桂 (901)
长江口邻近海域沉积物中生物硅溶解行为研究	吴彬, 吕伟香, 鲁超, 刘素美 (908)
汾河中游浮游藻类群落特征及水质分析	王爱爱, 冯佳, 谢树莲 (915)
基于三维荧光光谱-平行因子技术联用的湖泊浮游藻化学分类学研究	陈小娜, 韩秀荣, 苏荣国, 石晓勇 (924)
三峡库区典型消落带土壤及沉积物中溶解性有机质 (DOM) 的紫外-可见光谱特征	李璐璐, 江韬, 闫金龙, 郭念, 魏世强, 王定勇, 高洁, 赵铮 (933)
黄河口湿地表层沉积物中磷赋存形态的分析	于子洋, 杜俊涛, 姚庆祯, 陈洪涛, 于志刚 (942)
太湖和呼伦湖沉积物对磷的吸附特征及影响因素	揣小明, 杨柳燕, 程书波, 陈小峰, 穆云松 (951)
黄浦江溶解有机质光学特性与消毒副产物 NDMA 生成潜能的关系	董倩倩, 张艾, 李咏梅, 陈玲, 黄清辉 (958)
纳米零价铁降解水中多溴联苯醚 (PBDEs) 及降解途径研究	杨雨寒, 徐伟伟, 彭思侃, 卢善富, 相艳, 梁大为 (964)
铸铁还原氯乙酸的影响因素与机制研究	唐顺, 杨宏伟, 王小任, 解跃峰 (972)
磷回收对厌氧/好氧交替式生物滤池蓄磷/除磷的影响	张顺, 田晴, 汤曼琳, 李方 (979)
预处理方法对玉米芯作为反硝化固体碳源的影响	赵文莉, 郝瑞霞, 李斌, 张文怡, 杜鹏 (987)
陶粒 CANON 反应器的接种启动与运行	付昆明, 左早荣, 仇付国 (995)
冬季低温下 MBR 与 CAS 工艺运行及微生物群落特征	黄菲, 梅晓洁, 王志伟, 吴志超 (1002)
烷基多苷促进污泥水解产酸的研究	陈灿, 孙秀云, 黄诚, 沈锦优, 王连军 (1009)
高温厌氧消化中底物浓度对病原指示微生物杀灭的影响	操宏庆, 章菲菲, 李健, 童子林, 胡真虎 (1016)
兰州市大气降尘重金属污染评价及健康风险评价	李萍, 薛粟尹, 王胜利, 南忠仁 (1021)
珠江河口水域有机磷农药水生生态系统风险评价	郭强, 田慧, 毛潇萱, 黄韬, 高宏, 马建民, 吴军年 (1029)
海州湾表层沉积物重金属的来源特征及风险评价	李飞, 徐敏 (1035)
再生水无计划间接补充饮用水的雌激素健康风险	吴乾元, 邵一如, 王超, 孙艳, 胡洪营 (1041)
瓦埠湖流域庄墓镇农田土壤氮磷分布及流失风险评估	李如忠, 邵阳, 徐晶晶, 丁贵珍 (1051)
三峡库区消落带土壤汞形态分布与风险评价	张成, 陈宏, 王定勇, 孙荣国, 张金洋 (1060)
基于棕地的居民小区土壤重金属健康风险评价	陈星, 马建华, 李新宁, 刘德新, 李一蒙 (1068)
干旱区绿洲土壤氟污染生态风险评估研究	薛粟尹, 李萍, 王胜利, 南忠仁 (1075)
缙云山 3 种典型森林降雨过程及其氮素输入	孙素琪, 王玉杰, 王云琦, 张会兰, 于雷, 刘婕 (1081)
三峡库区兰陵溪小流域土地利用及景观格局对氮磷输出的影响	韩黎阳, 黄志霖, 肖文发, 田耀武, 曾立雄, 吴东 (1091)
黄土丘陵区县域农田土壤近 30 年有机碳变化及影响因素研究: 以甘肃庄浪县为例	师晨迪, 许明祥, 邱宇洁, 张志霞, 张晓伟 (1098)
天然林土壤有机碳及矿化特征研究	杨添, 戴伟, 安晓娟, 庞欢, 邹建美, 张瑞 (1105)
不同土壤湿润速率下中性紫色土磷素淋溶的动态变化	张思兰, 石孝均, 郭涛 (1111)
硫脲对酸性红壤 pH 值与金属元素有效性的影响	杨波, 王文, 曾清如, 周细红 (1119)
6 种陕北适生豆科植物生长对原油污染土壤的响应	山宝琴, 张永涛, 曹巧玲, 康振妍, 李淑媛 (1125)
基于 N:P 化学计量特征的高寒草甸植物养分状况研究	张仁懿, 徐当会, 陈凌云, 王刚 (1131)
人工生物结皮的发育演替及表土持水特性研究	吴丽, 陈晓国, 张高科, 兰书斌, 张德禄, 胡春香 (1138)
农田土壤自养微生物碳同化潜力及其功能基因数量、关键酶活性分析	陈晓娟, 吴小江, 简燕, 袁红朝, 周萍, 葛体达, 童成立, 邹冬生, 吴金水 (1144)
中亚热带马尾松林凋落物分解过程中的微生物与酶活性动态	宋影, 辜夕容, 严海元, 毛文韬, 吴雪莲, 万宇轩 (1151)
苏南地区香樟树皮中有机氯农药 (OCPs) 的污染水平及来源解析	周丽, 张秀蓝, 杨文龙, 李玲玲, 史双昕, 张利飞, 董亮, 黄业茹 (1159)
UV-B 辐射增强与 1,2,4-三氯苯污染复合胁迫对青菜生长的影响	刘翠英, 樊建凌, 徐向华 (1164)
Cu 和 Cd 胁迫下接种外生菌根真菌对油松根际耐热蛋白固持重金属能力的影响	张英伟, 柴立伟, 王东伟, 汪杰, 黄艺 (1169)
对硝基苯胺耐盐降解菌 S8 的筛选及特性研究	宋彩霞, 邓新平, 厉阍, 肖伟 (1176)
克雷伯氏菌生产絮凝剂 M-C11 的培养优化及其在污泥脱水中的应用	刘杰伟, 马俊伟, 刘彦忠, 杨娅, 岳东北, 王洪涛 (1183)
铅元素人为循环环境释放物形态分析	梁静, 毛建素 (1191)
污染排放与环境质量关系模型构建与应用	李名升, 孙媛, 陈远航, 张建辉 (1198)
微囊藻毒素微生物降解途径与分子机制研究进展	闫海, 王华生, 刘晓璐, 尹春华, 许倩倩, 吕乐, 马万彪 (1205)
《环境科学》征订启事 (809) 《环境科学》征稿简则 (819) 信息 (971, 978, 1050, 1175)	

瓦埠湖流域庄墓镇农田土壤氮磷分布及流失风险评估

李如忠, 邹阳, 徐晶晶, 丁贵珍

(合肥工业大学资源与环境工程学院, 合肥 230009)

摘要: 为揭示瓦埠湖流域庄墓镇农田土壤氮磷含量、分布及其流失风险状况, 在该镇下辖的 10 个行政村, 采集农田表层土壤样 162 份. 在对不同形态氮、磷含量分析测试的基础上, 采用氮磷指数法量化土壤氮磷流失风险, 并以基于 ArcGIS 的 Kriging 插值技术, 对全氮全磷含量、生物有效性氮磷含量及氮磷指数值进行空间插值模拟. 结果表明, 该镇土壤全氮含量平均值为 $1.67 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 全磷为 $0.71 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$; 生物有效性氮磷含量平均值分别为 $0.26 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $0.33 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 分别占全氮全磷含量的 14.93% 和 47.30%. 全氮含量较高的采样点主要散布在侯集村、杨湾村、刘浅村; 全磷含量较高的采样点主要集中在侯集村、杨湾村、枣林村. 整个庄墓镇土壤氮、磷指数平均值分别为 2.11 和 2.13. 10 个行政村氮、磷总指数大小排序为: 杨湾村 > 庄墓村 > 薛桥村 > 刘浅村 > 李庄村 > 金桥村 > 枣林村 > 张圩村 > 侯集村 > 徐岗村. 总体上, 庄墓镇土壤氮流失以中、低风险为主, 高风险区仅零星出现在杨湾村局部地方; 磷流失风险也以低风险为主, 中等以上风险也主要集中在杨湾村.

关键词: 氮磷指数; 全磷; 生物有效性氮磷; 土壤; 瓦埠湖流域; 风险评估

中图分类号: X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)03-1051-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.2014.03.033

Distribution Characteristics and Erosion Risk of Nitrogen and Phosphorus in Soils of Zhuangmu Town in Lake Wabuhu Basin

LI Ru-zhong, ZOU Yang, XU Jing-jing, DING Gui-zhen

(School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: To understand the loss risk of soil erosion in the Zhuangmu town in Lake Wabuhu watershed, concentration and spatial distribution of nitrogen and phosphorus in 162 surface soil samples collected from the farmlands in ten administrative villages of the town were investigated. The risk assessment was conducted by using the nitrogen and phosphorus index method after speciation analysis of soil nitrogen and phosphorus. Based on ArcGIS technology, the spatial interpolation of total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), and bioavailable nitrogen and phosphorus contents as well as nitrogen and phosphorus index values were performed by means of Kriging interpolation. The results show that, generally, average contents of TN and TP were obtained at $1.67 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ and $0.71 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, respectively. And the mean concentration of bioavailable nitrogen and phosphorus were estimated at $0.26 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ and $0.33 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, accounting for 14.93% and 47.30% of TN and TP contents, respectively. Spatially, the samples with high concentration of TN were mostly from Houji, Yangwan and Liuqian villages, whereas the samples sites with higher contents of TP located in Houji, Yangwan and Zaolin villages. The mean values of nitrogen index (NI) and phosphorus index (PI) for the whole town are 2.11 and 2.13, respectively. According to the numeric size of NI and PI, ten villages ranged in the order of Yangwan > Zhuangmu > Xueqiao > Liuqian > Lizhuang > Jinqiao > Zaolin > Zhangwei > Houji > Xugang village. In general, the soil nitrogen loss is dominated by low and medium risks in the Zhuangmu town, and high risk sporadically appears in local area of the Yangwan village. Like the nitrogen, soil phosphorus loss risk also gives priority to low, and above medium risk concentrates in the Yangwan village as well.

Key words: nitrogen index (NI) and phosphorus index (PI); total phosphorus (TP); bioavailable nitrogen and phosphorus; soil; Lake Wabuhu basin; risk assessment

农业土壤氮磷流失是造成湖库水体富营养化的重要原因^[1]. 随着我国点源污染控制水平的逐步提高, 非点源污染已经成为水环境恶化的主要原因^[2]. 氮和磷是水体富营养化的主要限制因子, 可以说水体富营养化的发生与农田氮磷的流失有着密切的关系^[3]. 1993 年, Lemunyon 等^[4]提出了综合考虑影响农业非点源磷污染主要因子的磷流失风险评估指数法, 其模型简单, 评价结果可以较为准确地识别磷流失的关键源区. 截至目前, 针对农业非点源磷流失量及流失风险问题, 国内外利用磷指数法已

开展了大量的研究. 张淑荣等^[5]利用磷指数法识别了于桥水库流域磷流失高风险区域, 即主要分布在丘陵平原区农田. 李琪等^[6]基于 Hughes 的磷分级方案^[7], 提出了修正的磷分级方案, 并将其运用于妫水河流域, 研究结果表明由于磷肥管理方式不合理, 研究区内大部分地区磷流失风险较高.

收稿日期: 2013-07-20; 修订日期: 2013-09-17

基金项目: 国家环境保护部良好湖泊生态环境保护专项

作者简介: 李如忠(1970~), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为水环境保护与修复机制, E-mail: Lrz1970@163.com

此外,张平等^[8]还以密云水库东庄小流域为例,采用氮磷综合指数法进行流失风险评估,结果表明东庄小流域大部分区域处于氮磷流失无风险或低风险区,高风险区主要集中在高肥料施用的农业用地. 由于氮磷指数法操作简单、流失因子确定较为容易、计算过程中数据获取难度相对较小等优点,目前已广泛应用于非点源污染评价中^[9~14]. 尽管如此,该方法仍还存在一定的不足,如评估结果代表的仅是氮磷流失程度的相对高低,不能反映氮磷的实际流失量等. 由于不同地区地形因子的差异性,针对不同研究区域,往往需要引用更多具体的影响因子.

瓦埠湖位于安徽省境内的淮河右岸,担负着淮南市、寿县等周边市县集中饮用水水源地和重要生态功能,并被列入国家环境保护部第2批“良好湖泊生态环境保护专项”保护对象. 因此,从控制汇水区氮磷负荷的角度看,有必要对湖泊汇流区土壤氮磷分布及其非点源流失特征开展分析和评估. 本研究以该流域东部典型乡镇——庄墓镇为对象,在解析农田土壤氮磷含量及其空间分布特征的基础上,利用氮磷指数法对农耕区土壤氮磷流失风险进行评估,识别氮磷流失的高风险区域,以期对瓦埠湖流域非点源氮磷污染防治提供依据和技术支持.

1 研究区概况

瓦埠湖位于安徽省境内的淮河右岸,湖体呈狭长形,南北向长52 km,东西平均宽仅5 km,为河湖一体的河道扩展型湖泊. 湖面跨越寿县、长丰县及淮南市的部分地区,水面面积156 km²,平均水深3.0~5.0 m,正常水位18.0 m. 瓦埠湖水质优良,是淮南市和寿县集中饮用水水源地,目前已被列入环保部第2批“良好湖泊生态环境保护专项”湖泊行列. 流域汇水区面积4200 km²,属丘陵平原区形式,为典型的传统农业生产区域. 瓦埠湖流域属亚热带季风性湿润气候,年均气温15℃,年均降雨量960 mm. 主要作物有水稻、小麦及油菜等.

庄墓镇位于长丰县境内,濒临瓦埠湖东岸中部地区,平均海拔50 m,以丘陵平原地貌为主,大体呈东南向西北方向倾斜. 发源于该镇东北边缘的庄墓河,既是庄墓镇的重要水源地,也是农田氮磷进入瓦埠湖的唯一水路通道. 庄墓镇总面积约41.3 km²,下辖杨湾村、李庄村、徐岗村、张圩村、侯集村、金桥村、枣林村、薛桥村、庄墓村、刘浅村等10个行政村,常住人口1.5万. 同流域内的其他乡镇一样,

庄墓镇也以传统农业为主,耕地面积约2000 hm²,第二、三产业相对较为落后.

2 模型与方法

2.1 氮磷含量的测定

2012年5月,在庄墓镇下辖的10个行政村,大致均匀地布设了162个采样点位(见图1),并进行GPS定位. 在每个采样点,利用铁铲采集耕作层(0~5 cm)土壤样品约200 g,经风干、研磨后,过200目筛,并收集50 g土样待测.

取研磨后的土样2 g于离心管中,加入20 mL的2 mol·L⁻¹氯化钾溶液后振荡30 min,离心并取上清液,采用纳氏试剂分光光度法^[15]测定NH₄⁺-N; 利用0.2% CaSO₄饱和溶液浸提后,利用紫外分光光度计比色法^[16]测定NO₃⁻-N; 将土样中加入碱性过硫酸钾,并于120℃温度下消解,采用紫外分光光度计比色法^[16]测定TN含量. 可交换态磷、铁铝磷等含量,采用化学连续提取法^[17]测定; 将0.2 g土样于450℃中煅烧3 h,采用碱熔-钼锑抗分光光度法^[18]测定TP含量. 土壤有机质采用重铬酸钾容量法^[19]测定,pH按1:5水土比,以便携式pH仪测定.

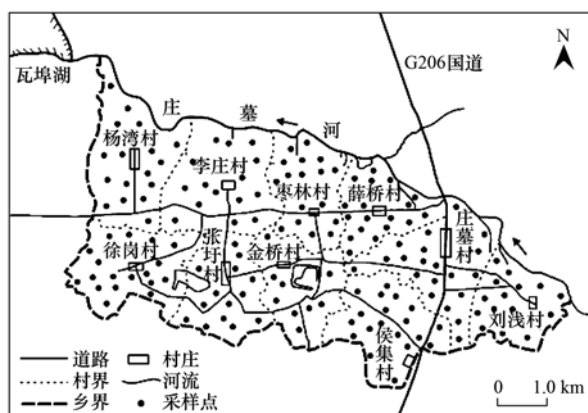


图1 采样点分布

Fig. 1 Sketch map of sampling sites

2.2 氮磷指数法

农田土壤氮磷流失程度,受许多因素的影响和控制. Gburek等^[20]将影响氮磷流失的因子归纳为源因子和迁移因子两大类. 氮、磷指数法^[4]是估算土壤氮磷流失风险的一种评价方法,该方法根据各因子测定值的大小,将其划分为若干等级,并根据影响因子在氮磷流失过程中作用的相对大小赋予相应的权重,进而计算氮、磷指数:

$$I = \left[\sum (S_i \times W_i) \right] \times \prod (T_j \times W_j) \quad (1)$$

式中, I 为氮或磷指数; S_i 为源因子评价指标 i 对应

的等级分值; W_i 为源因子评价指标 i 对应的权重; T_j 为迁移因子评价指标 j 对应的等级分值; W_j 为迁移因子评价指标 j 对应的权重。

2.3 源因子及其计算方法

源因子主要反映不同土地利用方式下土壤中氮磷含量,氮、磷肥输入,以及土壤氮磷的吸持能力等^[21],体现了土壤中可能发生流失的氮磷量。考虑到数据信息的可得性以及研究区实际状况,本研究将土壤中全氮、全磷含量,氮、磷肥施用量、施用时间以及施用方式等作为主要源因子。

2.3.1 土壤全氮、全磷含量

大量研究表明,土壤全氮、全磷含量是影响氮磷流失的重要因子^[22, 23]。因此,在土壤氮磷流失风险的估算中,全氮、全磷含量往往都被确定为重要的源因子。

2.3.2 施肥因子

(1) 施用量 农业化肥的施用不仅提高了土壤氮素、磷素水平,在持续过量施用的情况下,还可能因土壤板结等原因,加剧土壤养分的流失。一般来说,相关数据可以通过实地调查或对当地农资部门的调查获取,也可以借鉴毗邻地区农业化肥使用情况方面的数据。

(2) 施用时间 农耕施肥时间是影响氮磷流失量的重要因素,特别是施肥后连遇降雨会加剧氮磷的流失速率。由于作物种类及生长周期的差异,不同作物对应的施肥量和施肥时间存在差异。瓦埠湖流域夏季 6~8 月降水最多,春季次之,冬季最少。在庄墓镇,磷肥大多作为底肥主要在夏季水稻插秧及秋季小麦播种期间施用,氮肥则主要集中在初春小麦追肥及夏季水稻生长期施肥阶段。

(3) 施用方式 化肥的施用方式可直接影响氮磷流失,施用的深度越浅,氮磷流失的可能性往往也就越大。总的来看,不同施肥方式对于土壤氮磷流失影响程度由高到低的排序依次为^[21]:地表施肥 > 播散 > 压埋作肥 > 滴灌,等。

2.4 迁移因子及其计算方法

迁移因子表示直接或间接影响土壤中氮磷流失的因素。总的来看,迁移因子主要涉及土壤侵蚀量、氮磷流失场地距离受纳水体的长度等。

2.4.1 土壤侵蚀

土壤侵蚀是氮磷营养物迁移的重要载体,其本身也是非点源污染的一种重要形式。通用土壤流失方程是较为常用的土壤流失量估算方法,表达式为:

$$A = R \times K \times LS \times C \times P \quad (2)$$

式中, A 为土壤侵蚀量, $t \cdot (hm^2 \cdot a)^{-1}$; R 为降雨侵蚀因子, $MJ \cdot mm \cdot (hm^2 \cdot h \cdot a)^{-1}$; K 为土壤可蚀性因子, $t \cdot h \cdot (MJ \cdot mm)^{-1}$; LS 为坡长坡度因子,无量纲; C 为植被覆盖及管理因子,无量纲; P 为水土保持措施因子,无量纲。

(1) 降雨侵蚀因子 该指标表示由于降雨引起土壤侵蚀的潜在能力,与降雨历时、降雨强度等因素有关。针对不同土地利用类型及土壤性质的降雨侵蚀因子,国内外已开展了大量研究,提出了多种简易算法^[24~27],如采用逐月雨量简易算法估算降雨侵蚀因子,即^[28]:

$$R = \alpha F_F^{\beta} \quad (3)$$

$$F_F = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left[\left(\sum_{j=1}^{12} P_{i,j}^2 \right) / \left(\sum_{j=1}^{12} P_{i,j} \right) \right] \quad (4)$$

式中, $P_{i,j}$ 为第 i 年 j 月的降雨量, mm; N 为年数; R 为多年平均降雨侵蚀因子, $MJ \cdot mm \cdot (hm^2 \cdot h \cdot a)^{-1}$; α 、 β 为模型参数。

(2) 土壤可蚀性因子 土壤可蚀性因子 K 值是由土壤有机质含量及土壤质地类型综合确定的定量数值,反映了土壤被冲蚀的难易程度,是研究土壤侵蚀的基础。对于 K 值,既可以采用土壤可蚀性因子诺谟图进行查算^[29],也可以利用经验公式计算。

(3) 地形因子 地形因子 L 和 S 分别代表坡长及坡度因子,反映了地形、地貌特征对土壤侵蚀的影响,通常把 L 和 S 进行统一计算。在无法获得研究区一定比例数字高程图的情况下,可以考虑利用下式^[30]估算坡长坡度因子,即:

$$LS = (0.45L)^{\alpha} (65.41 \sin^2 \theta + 4.65 \sin \theta + 0.065)$$

式中, L 为坡长(m), θ 为坡面倾角, S 为坡度, α 为坡长指数。其中, α 的经验取值范围为:当 $S \geq 5\%$ 时,取 $\alpha = 0.5$; 当 $3.5\% \leq S < 4.5\%$ 时,取 $\alpha = 0.4$; 当 $1\% \leq S < 3\%$ 时,取 $\alpha = 0.3$; 当 $S < 1\%$ 时,则取 $\alpha = 0.2$ 。

(4) 植被覆盖及管理因子 植被覆盖可以削弱降雨能量,保持土壤水分,有效抵抗土壤侵蚀,从而减少氮磷的流失。植被覆盖及管理因子 C 值大小取决于具体的作物覆盖、管理措施及轮作顺序的综合作用,与土地类型及植被覆盖密切相关。一般地, C 在 0.001~1.0 之间取值,其中最大值 1.0 表示地面完全裸露,无植被覆盖;最小值 0.001 表示区域植被覆盖良好,地面得到良好的保护。

(5) 水土保持措施因子 有效的水土保持措施可以减缓土壤侵蚀度,在一定程度上削弱氮磷流失。对于水土保持措施因子 P ,一般都是通过对比法得到相应的 P 值,不同地区由于水土保持措施不同,

可能导致 P 值差异较大。

2.4.2 氮磷流失区距离溪流、沟渠等的距离

农田沟渠、河流系统是非点源氮磷营养物进入水体的主要传输通道。一般地,非点源流失区距离河流、沟渠的距离越近,潜在的氮磷流失风险也就越高。因此,针对相关距离的确定,是评价非点源氮磷流失风险的重要因子。庄墓河是瓦埠湖东部地区的一条重要入湖支流,也是庄墓镇境内唯一河流水体。在该河流左岸,有 3 条支流和排灌渠延伸至庄墓镇所辖区域内,并与田间地头的排水沟渠相通,农田流失的氮磷很容易通过沟渠的收集、传输而进入庄墓河,并最终流入瓦埠湖。

3 结果与分析

3.1 氮磷营养物含量统计结果

庄墓镇农田土壤 pH 平均值为 7.11,土壤中氮、磷及有机质含量的相关统计结果见表 1。可以看出,区域内土壤全氮含量较高,最大值达到 2.69

$\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,平均值为 $1.67\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,比邻近的巢湖流域高出 $0.64\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ [31]。而且,该区域全氮变异系数仅为 18%,表明区域内土壤全氮含量较为均匀。全磷含量最大值与最小值相差较大,差值高达 $2.68\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,平均值为 $0.71\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,比流溪河流域 [32] 菜地土壤全磷平均含量 ($2.40\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$) 低了 $1.69\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。硝态氮和可交换态磷的变异系数相当大,分别为 165.01% 和 125.01%,表明区域内二者含量分布的均匀性相对较差。大体上,氨氮、铁铝磷和全磷的变异系数较为接近,且都低于 60%,表明三者含量空间分布的均匀性相对较好。虽然所有指标的偏度均大于 0,但最大值也仅为 3.09,表明各营养物含量的正偏态分布特征较为明显。这里,各指标的峰度值均大于 3,其中氨氮与硝态氮峰度分别高达 14.88 和 14.81,说明二者的分布与正态分布相比更为陡峭,呈尖峰分布。庄墓镇土壤有机质平均值为 2.01%,大体上与巢湖周边表土有机质含量较为接近 [31]。

表 1 土壤营养物统计分析结果

Table 1 Statistical results of soil nutrient contents							
统计值	氨氮 / $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	硝态氮 / $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	全氮 / $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	交换态磷 / $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	铁铝磷 / $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	全磷 / $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	有机质 /%
最大值	0.81	0.63	2.69	0.21	0.89	2.86	4.22
最小值	0.00	0.00	1.08	0.00	0.04	0.18	0.90
平均值	0.20	0.06	1.67	0.03	0.30	0.71	2.01
中值	0.19	0.02	1.63	0.02	0.27	0.60	1.92
变异系数/%	45.45	165.01	17.59	125.01	57.47	57.85	30.33
偏度	1.99	3.09	0.76	2.41	1.02	1.90	1.12
峰度	14.88	14.81	3.95	9.92	3.93	8.42	4.76
概率分布形式	Gamma	Logistic	Logistic	Gamma	Gamma	Logistic	Maximum Extreme

在氮磷营养物中,可以被土壤生物直接利用的不同形态氮和磷,称为生物有效性氮、生物有效性磷 [33]。庄墓镇农田土壤生物有效性氮(即氨氮和硝态氮)平均含量为 $0.26\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,生物有效性磷(即可

交换态磷和铁铝磷)平均含量为 $0.33\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。利用基于 ArcGIS 的 Kriging 插值技术,得到生物有效性氮磷含量的空间分布图,见图 2。

不难看出,生物有效性氮含量高的区域相对较

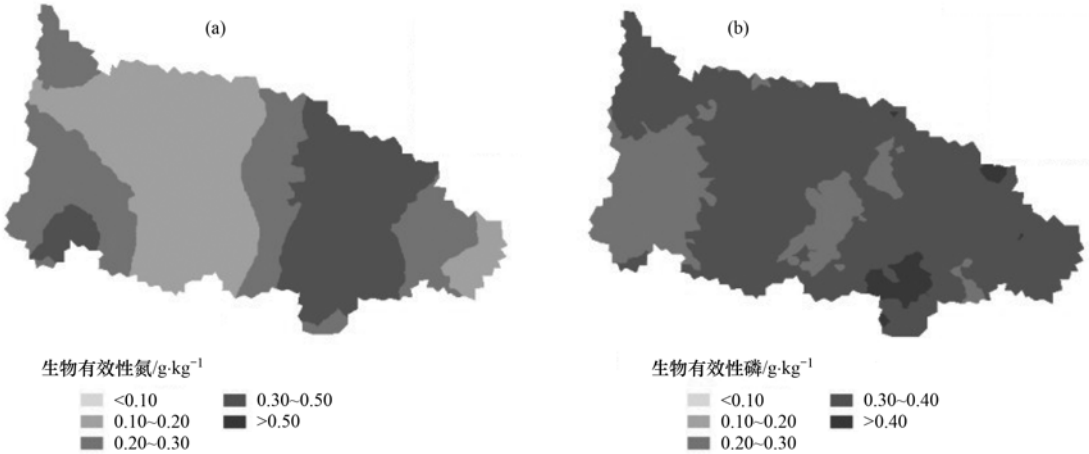


图 2 生物有效性氮和磷的空间分布示意

Fig. 2 Spatial distribution of bioavailable nitrogen and phosphorus contents in soil

为集中,主要分布在东部的薛桥村、侯集村以及庄墓村的部分地区;生物有效性磷含量绝大多数介于 $0.30 \sim 0.40 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间,相对较高的区域主要集中在侯集村的局部区域,而徐岗村的大部分地区以及金桥村与杨湾村的部分地区,有效性磷的含量稍低. 总体上,庄墓镇农田土壤生物有效性氮占全氮含量的 $0.61\% \sim 46.46\%$,平均含量仅为 14.93% . 事实上,在作物生长过程中,通过有机态氮矿化作用释放出来的氮,往往是作物重要的氮素来源,因此土壤有机态氮在作物氮素营养中起着很大的作用. 毫无疑问,庄墓镇土壤中较高的有机氮含量和在全氮中所占比重,意味着该地区土壤具有较大的生物有效性氮潜能. 就土壤磷素来看,该区域生物有效性磷占全磷含量的 $13.07\% \sim 89.55\%$,平均值高达 47.30% ,表明庄墓镇土壤中可被生物直接利用的磷所占比重显著高于氮.

3.2 源因子的空间分布特征

同全国其他很多地方一样,瓦埠湖流域也普遍

存在超量使用化肥、农药的问题,致使土壤中氮磷累积较为明显. 其中,氮肥主要施用于初春及夏季,并以基肥加追肥的施肥方式为主. 庄墓镇 10 个行政村的农业耕作方式基本相同. 根据 2006 年中国统计年鉴中有关安徽地区施肥量数据,初步估算该镇年氮肥施用总量约 667.10 t ,平均施肥量为 $333.50 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,且从调查的情况看,种后地表施肥方式采用较多;磷肥施用量为 233.60 t ,平均施用量 $116.80 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,且磷肥大都采用播散形式进行施用. 根据 162 个点位的土壤全氮、全磷含量,利用 Kriging 插值技术得出该镇土壤全氮、全磷含量分布,见图 3. 总体上,全氮含量 $< 1.20 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的样本占样本总数的 3.00% ,含量处于 $1.20 \sim 1.50 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的占 23.50% , $1.5 \sim 1.80 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 占 43.80% , $1.80 \sim 2.50 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 占 24.70% ,含量高于 $2.50 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的占 5.00% . 从图 3 可以看出,含量较高的采样点主要散布在侯集村、杨湾村、刘浅村,相对较低的采样点主要出现在李庄村、金桥村以及张圩村的部分地区.

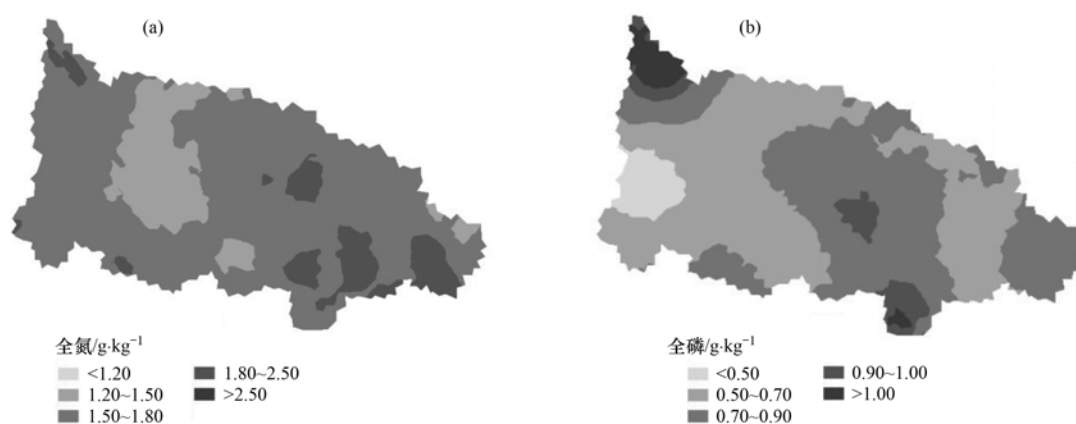


图3 土壤全氮全磷空间分布示意

Fig. 3 Spatial distribution of TN and TP contents in soil

同样,磷肥的过量施用也是影响该区域土壤全磷含量的重要因素. 从图 3 可见,全磷含量的空间差异性相当大. 在 162 个采样点中,含量低于 $0.50 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的样本占样本总数的 34.60% ,含量处于 $0.50 \sim 0.70 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的占 25.90% , $0.70 \sim 0.90 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 占 13.00% , $0.90 \sim 1.00 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 占 5.60% ,含量高于 $1.0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的占 19.10% . 全磷含量相对较高的采样点主要集中在侯集村、杨湾村、枣林村,平均含量分别为 844.3 、 763.9 、 $793.0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$. 由实地调查得知,该地区磷肥施用时间大多集中在夏、秋季,主要用作插播水稻和种植小麦的底肥. 从图 3 还可以看出,李庄村、张圩村、庄墓村,特别是在杨湾村与徐岗村交界部分地区,耕地全磷含量明显偏少. 对比土壤全氮与生物有

效性氮含量的分布情况,二者重合度并不高;全磷与生物有效性磷含量分布图的重合部分也不多,表明庄墓镇农田土壤中,有机氮与全氮、有机磷与全磷并不成比例地增加或减少.

3.3 迁移因子的空间分布特征

3.3.1 土壤侵蚀因子

从地理位置上看,庄墓镇所在地恰好介于合肥市与淮南市之间. 鉴于瓦埠湖流域尚还缺乏专门、可靠的气象数据资料,考虑以合肥市与淮南市的逐月降雨量资料平均值作为该区域的降水资料,见表 2. 在此基础上,根据式(3)和式(4)计算降雨侵蚀因子 R 值为 148.09 ,数值大小与北京于桥水库流域丘陵区降雨侵蚀因子值较为接近^[5].

表 2 瓦埠湖流域 2007 ~ 2011 年逐月降雨量

Table 2 Monthly rainfall of Lake Wabuhu watershed during the years of 2007-2011

年份	降雨量/mm											
	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月
2007	13.5	55.3	76.5	77.9	65.9	68.4	312.8	200.7	92.4	29.9	23.6	22.7
2008	90.0	11.6	29.8	136.3	68.4	135.7	232.7	199.5	12.4	41.7	20.6	11.3
2009	20.3	70.0	66.2	49.6	95.6	140.7	192.4	101.3	53.6	10.1	105.2	49.6
2010	12.2	79.7	91.7	154.2	70.3	89.3	244.2	139.8	237.1	20.0	5.9	14.5
2011	9.0	26.2	37.2	8.7	49.5	172.9	181.8	250.4	44.5	47.7	57.7	12.3

庄墓镇耕地土壤类型以水稻土为主,约占耕地总面积的 65.80%,其次是黄壤土,占 33.90%。总体上,2 种土壤在研究区内分布较为均匀,因此土壤可蚀性因子 K 值也大体相同。采用文献[34]的确定方法,得到 K 为 0.253。从实地调查的情况看,庄墓镇境内植被覆盖度较高,特别是道路、渠道两旁均有一定宽度的绿化林带,参照文献[35],不妨取庄墓镇 C 值为 0.12。庄墓镇农田基本都采用水旱作物轮种的方式,田间地块大都有田埂的维护,灌溉排水沟渠体系大体较为完善,一定程度上减缓了氮磷径流流失。总的来看,整个研究区域水土保持措施及境况大体相同,参照文献[36],确定水土保持措施因子 P 值为 0.35。

庄墓镇所在地基本上属于丘陵平原地貌类型,地形总体上较为平缓,局部区域存在一定的起伏和倾斜,特别是靠近各支流的两侧地区。受坡度角及坡长指数差异的影响,各村庄土壤侵蚀情况存在一

定的差异,见表 3。

由表 3 可以看出,各村庄土壤侵蚀指数值在 46.42 ~ 80.40 之间,由于降雨量及地形因子等方面的差异,该值较北京地区于桥水库流域^[11]大部分区域的土壤侵蚀模数高,但较毗邻的巢湖流域^[37]部分区域侵蚀模数低。对照图 1 不难看出,土壤侵蚀相对较为严重的区域主要分布在位于该镇境内东南部的庄墓村、侯集村,以及西南部的徐岗村。

3.3.2 距河流及湖泊的距离

由于各行政村面积不大,采样点间距较小,因此本研究将各村庄的中心点作为基本点,利用卫星图大致估算各采样点距离庄墓河及瓦埠湖的远近,见表 4。其中,刘浅村距离瓦埠湖最远,但离庄墓河却很近,而杨湾村则距庄墓河和瓦埠湖都很近。由于庄墓河是研究区唯一的入湖河流,因此距离因子为这两个村庄氮磷流失风险的重要影响因子。

表 3 各村庄土壤侵蚀量

Table 3 Soil erosion indexes corresponding to different villages

项目	村庄									
	杨湾村	李庄村	徐岗村	张圩村	侯集村	金桥村	枣林村	薛桥村	庄墓村	刘浅村
土壤侵蚀量/ $t \cdot (hm^2 \cdot a)^{-1}$	58.71	65.65	71.91	54.92	71.91	50.84	46.42	65.65	80.40	62.28

表 4 距离因子

Table 4 Distance factors for different villages

项目	村庄									
	杨湾村	李庄村	徐岗村	张圩村	侯集村	金桥村	枣林村	薛桥村	庄墓村	刘浅村
距庄墓河/km	0.97	2.08	3.07	3.66	3.64	2.32	2.14	1.22	1.73	0.59
距瓦埠湖/km	6.88	8.60	8.14	9.43	14.54	13.46	10.49	11.46	13.90	15.34

3.4 氮磷流失风险评估

毫无疑问,源因子和迁移因子等对于氮磷流失的贡献度和重要性存在一定的差异,考虑采用专家打分法,对各因子赋权值,结果见表 5 和表 6。一般情况下,土壤有机态氮组分构成了土壤全氮的绝大部分,庄墓镇也不例外。由于庄墓镇土壤有效氮含量相对较低(14.93%),为此考虑将源因子中土壤全氮因子权重定为 0.4。由于土壤中生物有效性

磷占总磷含量的比重较大(47.30%),为此将土壤全磷因子权值定为 1。

从源因子层面看,由于水文、气象条件以及作物生长等的影响,不同施肥量、施肥方式和施肥时间等带来的氮磷流失风险也不相同;从迁移因子层面来看,土壤侵蚀情况、距离水体远近等因素,同样影响氮磷流失的差异。为此,考虑将源因子和迁移因子按照可能带来风险程度的差异,将其划分为较

低、低、中等、高和较高等 5 个等级,并赋予相应的分值. 其中,源因子分值分别为 1、2、4、8 和 10 分,迁移因子分别为 0.6、0.7、0.8、0.9 和 1.0 分. 也即,不同等级值表示相应的氮磷流失风险的可能性不同. 根据相关文献^[5,9,37],并结合庄墓镇农业生产和地形、地貌特征,初步制定源因子和迁移因子相应于不同流失风险等级的标准,见表 5 和表 6. 在此基础上,利用式(1)可以计算得到各采样点相应的

氮磷指数值. 表 7 给出了各行政村农田土壤氮磷指数平均值. 显然,各村庄相应的氮指数和磷指数都较为接近,且尤以杨湾村明显偏大. 总体上,10 个行政村的氮磷总指数(即两者之和)大小排序为:杨湾村>庄墓村>薛桥村>刘浅村>李庄村>金桥村>枣林村>张圩村>侯集村>徐岗村. 整个庄墓镇农田土壤氮指数的平均值为 2.11,磷指数平均值为 2.13.

表 5 氮流失风险评价体系

Table 5 Evaluation criterion of nitrogen loss risk							
项目	因子	权重	等级值				
			较低	低	中	高	较高
			1	2	4	8	10
源因子	土壤全氮/g·kg ⁻¹	0.4	<1.2	1.2~1.5	1.5~1.8	1.8~2.5	>2.5
	氮肥施用量/kg·hm ⁻²	0.9	0~100	100~200	200~400	400~600	>600
	氮肥施用方式	0.8	压埋作肥	播散	种后表施	种前3个月内表施	种前>3个月表施
	氮肥施用时间	0.7	初春	初春、夏末	春、夏末	夏、秋	夏
项目	因子	权重	等级值				
			较低	低	中	高	较高
			0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
迁移因子	土壤侵蚀	1	<2	2~10	10~25	25~50	>50
			0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
	距河流距离/km	1	>3	2~3	1~2	0.5~1	<0.5
	距湖泊距离/km	0.5	>20	15~20	10~15	5~10	<5

表 6 磷流失风险评价体系

Table 6 Evaluation criterion of phosphorus loss risk							
项目	因子	权重	等级值				
			较低	低	中	高	较高
			1	2	4	8	10
源因子	土壤全磷/g·kg ⁻¹	1	<0.5	0.5 ~ 0.7	0.7 ~ 0.9	0.9 ~ 1.0	>1.0
	磷肥施用量/kg·hm ⁻²	0.9	0 ~ 30	30 ~ 100	100 ~ 150	150 ~ 200	>200
	磷肥施用方式	0.8	压埋作肥	播散	种后表施	种前 3 个月内表施	种前 >3 个月表施
	磷肥施用时间	0.7	初春	初春、夏末	春、夏末	夏、秋	夏
项目	因子	权重	等级值				
			较低	低	中	高	较高
			0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
迁移因子	土壤侵蚀	1	<2	2 ~ 10	10 ~ 25	25 ~ 50	>50
			0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
	距河流距离/km	1	>3	2 ~ 3	1 ~ 2	0.5 ~ 1	<0.5
	距湖泊距离/km	0.5	>20	15 ~ 20	10 ~ 15	5 ~ 10	<5

表 7 各行政村土壤氮磷指数平均值

Table 7 Mean values of soil nitrogen and phosphorus indexes in each administrative village									
项目	村庄								
	杨湾村	李庄村	徐岗村	张圩村	侯集村	金桥村	枣林村	薛桥村	庄墓村
氮指数	4.77	1.95	1.09	1.08	1.25	1.59	1.58	2.53	2.59
磷指数	4.85	2.61	1.06	1.18	0.98	1.67	1.62	2.48	2.62
氮磷总指数	9.62	4.56	2.15	2.26	2.23	3.26	3.20	5.01	5.21

庄墓镇所在地属于丘陵平原地带,地势相对较为平缓. 针对这一特点,初步提出针对该类地区土壤氮磷流失风险等级划分标准,见表 8.

根据各采样点相应的氮磷指数值,结合表 8 的风险等级阈值,利用基于 ArcGIS 的 Kriging 插值软件,绘制庄墓镇土壤氮磷流失风险指数分布图,见图

表 8 氮磷流失风险等级划分标准
Table 8 Rating standards for nitrogen and phosphorus loss risk assessment

风险等级	极低	低	中	高
氮指数	<1	1~2	2~5	>5
磷指数	<1	1~3	3~6	>6

4. 可以看出,氮流失高风险区域出现在杨湾村局部地方;中等风险出现在距离庄墓河及瓦埠湖较近的杨湾村、枣林村、薛桥村、庄墓村和刘浅村等;李庄村虽然毗邻庄墓河,但它和徐岗村、张圩村、金桥村

和侯集村等都归属于低流失风险区域,表明除了距离因子外,其它一些因素同样可能决定风险态势. 相比较而言,极低风险仅是零散的出现在徐岗村和张圩村. 从不同风险覆盖的样本数看,中度风险样本占样本总数的 40. 12%,低风险占 46. 91%,极低风险占 8. 64%. 在磷流失风险方面,整个庄墓镇基本以低风险为主,样本数占样本总数的 66. 67%; 中度风险占 15. 43%,主要集中在杨湾村; 极低风险占 14. 20%,主要分布在徐岗村、侯集村的部分区域;高风险区占 3. 70%,主要集中在杨湾村东南部.

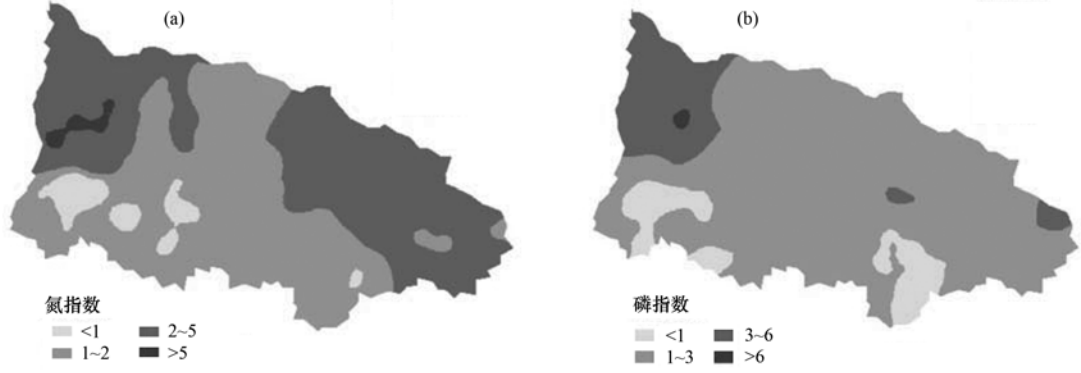


图 4 氮与磷流失风险指数空间分布示意

Fig. 4 Spatial distribution of nitrogen and phosphorus loss risk indexes

4 结论

(1)庄墓镇全氮含量为 1. 08 ~ 2. 69 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,平均值为 1. 67 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$; 全磷含量 0. 18 ~ 2. 86 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,平均值为 0. 71 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$. 农田土壤生物有效性氮占全氮含量的 0. 61% ~ 46. 46%, 平均含量仅为 14. 93%; 生物有效性磷占全磷含量的 13. 07% ~ 89. 55%, 平均值高达 47. 30%, 表明庄墓镇土壤中可被生物直接利用的有效磷所占比重显著高于氮.

(2)在源因子空间分布方面,全氮含量相对较高的采样点主要散布在侯集村、杨湾村、刘浅村,含量较低的采样点则主要出现在李庄村、金桥村及张圩村的部分地区; 全磷含量较高的采样点主要集中在侯集村、杨湾村、枣林村, 平均含量分别为 844. 3、763. 9、793. 0 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$. 10 个行政村土壤侵蚀指数值在 46. 42 ~ 80. 40 之间,土壤侵蚀相对较为严重的区域主要分布在该镇东南部的庄墓村、侯集村,以及西南部的徐岗村.

(3)庄墓镇农田土壤氮、磷指数平均值分别为 2. 11 和 2. 13. 10 个行政村氮磷总指数大小排序为: 杨湾村 > 庄墓村 > 薛桥村 > 刘浅村 > 李庄村 > 金桥村 > 枣林村 > 张圩村 > 侯集村 > 徐岗村.

(4)庄墓镇农田土壤氮流失风险主要以中、低风险为主,高风险区仅零星出现在杨湾村的局部地方, 中等风险出现在距离庄墓河及瓦埠湖较近的杨湾村、枣林村、薛桥村、庄墓村和刘浅村等; 磷流失风险以低风险为主, 中等风险主要出现在杨湾村, 高风险区主要集中在杨湾村东南部. 尽管该镇农田土壤氮磷流失风险总体不是很严重,但合理施用化肥和加强田间管理仍很有必要.

参考文献:

[1] Drewry J J, Newham L T H, Croke B F W. Suspended sediment, nitrogen and phosphorus concentrations and exports during storm-events to the Tuross estuary, Australia [J]. Journal of Environmental Management, 2009, **90**(2): 879-887.

[2] Csathó P, Sisák I, Adimsky L, et al. Agriculture as a source of phosphorus causing eutrophication in Central and Eastern Europe [J]. Soil Use and Management, 2007, **23**(S1): 36-56.

[3] 黄东风, 王果, 李卫华, 等. 菜地土壤氮磷面源污染现状、机制及控制技术 [J]. 应用生态学报, 2009, **20**(4): 991-1001.

[4] Lemunyon J L, Gilbert R G. The concept and need for a phosphorus assessment tool [J]. Journal of Production Agriculture, 1993, **6**(4): 483-496.

[5] 张淑荣, 陈利顶, 傅伯杰, 等. 农业区非点源污染潜在危险性评价——以于桥水库流域磷流失为例 [J]. 第四纪研究,

- 2003, **23**(3): 262-269.
- [6] 李琪, 陈利顶, 齐鑫, 等. 妯水河流域农耕地非点源磷污染危险性评价与关键源区识别[J]. 环境科学, 2008, **29**(1): 33-37.
- [7] Hughes K J, Magette W L, Kurz I. Identifying critical source areas for phosphorus loss in Ireland using field and catchment scale ranking schemes [J]. *Journal of Hydrology*, 2005, **304**(1-4): 430-445.
- [8] 张平, 高阳昕. 基于氮磷指数的小流域氮磷流失风险评估[J]. 生态环境学报, 2011, **20**(6-7): 1018-1025.
- [9] 王丽华, 王晓燕, 张志铎, 等. 磷指数法——PI(P Index)的修正及应用[J]. 首都师范大学学报(自然科学版), 2006, **27**(2): 85-88.
- [10] Buczko U, Kuchenbuch R O. Phosphorus indices as risk assessment tools in the USA and Europe: A review [J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2007, **170**(4): 455-460.
- [11] Heckrath G, Bechmann M, Ekholm P, *et al.* Review of indexing tools for identifying high risk areas of phosphorus loss in Nordic catchments [J]. *Journal of Hydrology*, 2008, **349**(1-2): 68-87.
- [12] Sonmez O, Pierzynski G M, Frees L, *et al.* A field-based assessment tool for phosphorus losses in runoff in Kansas [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2009, **64**(3): 212-222.
- [13] 宋月君, 吴胜军, 杨洁, 等. 基于 GIS 技术的农用地非点源磷污染危险性评价[J]. 测绘科学, 2009, **34**(3): 164-166.
- [14] Bechmann M, Stålnacke P, Kværnø S, *et al.* Integrated tool for risk assessment in agricultural management of soil erosion and losses of phosphorus and nitrogen [J]. *Science of the Total Environment*, 2009, **407**(2): 749-759.
- [15] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法 [M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [16] 包先明, 陈开宁, 范成新. 沉水植物生长对沉积物间隙水中的氮磷分布及界面释放的影响[J]. 湖泊科学, 2006, **18**(5): 515-522.
- [17] 朱广伟, 秦伯强. 沉积物中磷形态的化学连续提取法应用研究[J]. 农业环境科学学报, 2003, **22**(3): 349-352.
- [18] 陆杏英. 钼锑抗比色法测定土壤中的总磷[J]. 环境科学与技术, 1991, **4**(3): 33-34.
- [19] 涂成龙, 刘丛强. 城市公路绿化带土壤有机碳的分异[J]. 水土保持学报, 2008, **22**(1): 100-104.
- [20] Gburek W J, Sharpley A N, Heathwaite L, *et al.* Phosphorus management at the watershed scale: a modification of the phosphorus index [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2000, **29**(1): 130-144.
- [21] 李娜, 郭怀成. 农业非点源磷流失潜在风险评价——磷指数法研究进展[J]. 地理科学进展, 2010, **29**(11): 1360-1367.
- [22] Kleinman P J A, Sharpley A N, Moyer B G, *et al.* Effect of mineral and manure phosphorus sources on runoff phosphorus [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2002, **31**(6): 2026-2033.
- [23] Daverede I C, Kravchenko A N, Hoefl R G, *et al.* Phosphorus runoff: effect of tillage and soil phosphorus levels [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2003, **32**(6): 1436-1444.
- [24] 吴昌广, 林德生, 肖文发, 等. 三峡库区降雨侵蚀力时空分布特征[J]. 应用生态学报, 2011, **22**(1): 151-158.
- [25] 程艳, 李柄花, 此里能布, 等. 洱海弥直河流域降雨侵蚀力特征研究[J]. 中国水土保持, 2008, (6): 29-33.
- [26] Renard K G, Freimund J R. Using monthly precipitation data to estimate the R-factor in the Revised USLE [J]. *Journal of Hydrology*, 1994, **157**(1-4): 287-306.
- [27] 赵文武, 徐海燕, 解纯营. 黄土丘陵沟壑区延河流域降雨侵蚀力的估算[J]. 农业工程学报, 2008, **24**(1): 38-42.
- [28] 章文波, 付金生. 不同类型雨量资料估算降雨侵蚀力[J]. 资源科学, 2003, **25**(1): 35-41.
- [29] 蔡永明, 张科利, 李双才. 不同粒径制间土壤质地资料的转换问题研究[J]. 土壤学报, 2003, **40**(4): 511-517.
- [30] 陈克平, 宁大同. 基于 GIS 非点源污染模型的地形因子分析[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 1997, **33**(2): 281-284.
- [31] 陈书琴, 储昭升, 胡社荣, 等. 巢湖周边表土中有机质、全氮和全磷空间分布及其相关性[J]. 环境科学, 2012, **33**(9): 3032-3037.
- [32] 戴照福, 王继增, 程炯, 等. 流溪河流域菜地土壤磷素特征及流失风险分析[J]. 广东农业科学, 2006, (4): 82-84.
- [33] 李如忠, 周爱佳, 童芳, 等. 合肥城区地表灰土氮磷形态分布及生物有效性[J]. 环境科学, 2012, **33**(4): 1160-1166.
- [34] 岑奕, 丁文峰, 张平仓. 华中地区土壤可蚀性因子研究[J]. 长江科学院院报, 2011, **28**(10): 66-68.
- [35] 王万忠, 焦菊英. 中国的土壤侵蚀因子定量评价研究[J]. 水土保持通报, 1996, **16**(5): 1-20.
- [36] 游松财, 李文卿. GIS 支持下的土壤侵蚀量估算——以江西省泰和县灌溪乡为例[J]. 自然资源学报, 1999, **14**(1): 62-68.
- [37] 周慧平, 高超. 巢湖流域非点源磷流失关键源区识别[J]. 环境科学, 2008, **29**(10): 2696-2702.

CONTENTS

Concentration and Community Diversity of Microbes in Bioaerosols in the Qingdao Coastal Region	QI Jian-hua, WU Li-jing, GAO Dong-mei, <i>et al.</i> (801)
Carbon Source Apportionment of PM _{2.5} in Chongqing Based on Local Carbon Profiles	ZHANG Can, ZHOU Zhi-en, ZHAI Chong-zhi, <i>et al.</i> (810)
Observation of Atmospheric Pollutants in the Urban Area of Beibei District, Chongqing	XU Peng, HAO Qing-ju, JI Dong-sheng, <i>et al.</i> (820)
A Floating-Dust Case Study Based on the Vertical Distribution of Aerosol Optical Properties	WANG Yuan, DENG Jun-ying, SHI Lan-hong, <i>et al.</i> (830)
Analysis and Assessment of Atmospheric Pollution Based on Accumulation Characterization of Heavy Metals in <i>Platanus acerifolia</i> Leaves	LIU Ling, FANG Yan-ming, WANG Shun-chang, <i>et al.</i> (839)
Study on the Emission Characteristics and Potential Environment Hazards of the Heat-setting Machine of the Typical Dyeing and Finishing Enterprise	XU Zhi-rong, WANG Peng, WANG Zhe-ming, <i>et al.</i> (847)
Implementation Results of Emission Standards of Air Pollutants for Thermal Power Plants; a Numerical Simulation	WANG Zhan-shan, PAN Li-bo (853)
On Road Particle Emission Characteristics of a Chinese Phase IV Natural Gas Bus	LOU Di-ming, CHENG Wei, FENG Qian (864)
Chemical Compositions of <i>n</i> -Alkanols in Smoke from Rice and Maize Straw Combustion	LIU Gang, LI Jiu-hai, WU Dan, <i>et al.</i> (870)
Diurnal and Seasonal Variations of Surface Atmospheric CO ₂ Concentration in the River Estuarine Marsh	ZHANG Lin-hai, TONG Chuan, ZENG Cong-sheng (879)
Partial Pressure and Diffusion Flux of Dissolved Carbon Dioxide in the Mainstream and Tributary of the Central Three Gorges Reservoir in Summer	LI Shuang, WANG Yu-chun, CAO Man, <i>et al.</i> (885)
Emission of CH ₄ , N ₂ O and NH ₃ from Vegetable Field Applied with Animal Manure Composts	WAN He-feng, ZHAO Chen-yang, ZHONG Jia, <i>et al.</i> (892)
Effects of Different Iron Oxides on Methane Emission in Paddy Soil as Related to Drying/Wetting Cycles	ZHANG Tian-jiao, TANG Jia, ZHUANG Li, <i>et al.</i> (901)
Study on the Dissolution Behavior of Biogenic Silica in the Changjiang Estuary Adjacent Sea	WU Bin, LÜ Wei-xiang, LU Chao, <i>et al.</i> (908)
Phytoplankton Community Structure and Assessment of Water Quality in the Middle and Lower Reaches of Fenhe River	WANG Ai-ai, FENG Jia, XIE Shu-lian (915)
Lake Algae Chemotaxonomy Technology Based on Fluorescence Excitation Emission Matrix and Parallel Factor Analysis	CHEN Xiao-na, HAN Xiu-rong, SU Rong-guo, <i>et al.</i> (924)
Ultraviolet-Visible (UV-Vis) Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) in Soils and Sediments of Typical Water-Level Fluctuation Zones of Three Gorges Reservoir Areas	LI Lu-lu, JIANG Tao, YAN Jin-long, <i>et al.</i> (933)
Distribution of Phosphorus in Surface Sediments from the Yellow River Estuary Wetland	YU Zi-yang, DU Jun-tao, YAO Qing-zhen, <i>et al.</i> (942)
Characteristics and Influencing Factors of Phosphorus Adsorption on Sediment in Lake Taihu and Lake Hulun	CHUAI Xiao-ming, YANG Liu-yan, CHENG Shu-bo, <i>et al.</i> (951)
Linking Optical Properties of Dissolved Organic Matter with NDMA Formation Potential in the Huangpu River	DONG Qian-qian, ZHANG Ai, LI Yong-mei, <i>et al.</i> (958)
Reductive Debromination of Polybrominated Diphenyl Ethers in Aquifer by Nano Zero-valent Iron; Debromination Kinetics and Pathway	YANG Yu-han, XU Wei-wei, PENG Si-kan, <i>et al.</i> (964)
Influencing Factors and Reaction Mechanism of Chloroacetic Acid Reduction by Cast Iron	TANG Shun, YANG Hong-wei, WANG Xiao-mao, <i>et al.</i> (972)
Effect of Phosphorus Recovery on Phosphorous Bioaccumulation/Harvesting in an Alternating Anaerobic/Aerobic Biofilter System	ZHANG Shun, TIAN Qing, TANG Man-lin, <i>et al.</i> (979)
Effects of Pretreatment Methods on Corncob as Carbon Source for Denitrification	ZHAO Wen-li, HAO Rui-xia, LI Bin, <i>et al.</i> (987)
Start-Up by Inoculation and Operation of a CANON Reactor with Haydite as the Carrier	FU Kun-ming, ZUO Zao-rong, QIU Fu-guo (995)
Diversity of Operation Performance and Microbial Community Structures in MBRs and CAS Processes at Low Temperature	HUANG Fei, MEI Xiao-jie, WANG Zhi-wei, <i>et al.</i> (1002)
Enhanced Hydrolysis and Acidification of Waste Activated Sludge by Alkyl Polyglycosides	CHEN Can, SUN Xiu-yun, HUANG Cheng, <i>et al.</i> (1009)
Effect of Substrate Concentration on Pathogen Indicators Inactivation During Thermophilic Anaerobic Digestion	CAO Hong-qing, ZHANG Fei-fei, LI Jian, <i>et al.</i> (1016)
Pollution Evaluation and Health Risk Assessment of Heavy Metals from Atmospheric Deposition in Lanzhou	LI Ping, XUE Su-yin, WANG Sheng-li, <i>et al.</i> (1021)
Ecological Risk Assessment of Organophosphorus Pesticides in Aquatic Ecosystems of Pearl River Estuary	GUO Qiang, TIAN Hui, MAO Xiao-xuan, <i>et al.</i> (1029)
Source Characteristics and Contamination Evaluation of Heavy Metals in the Surface Sediments of Haizhou Bay	LI Fei, XU Min (1035)
Health Risk Induced by Estrogens During Unplanned Indirect Potable Reuse of Reclaimed Water from Domestic Wastewater	WU Qian-yuan, SHAO Yi-ru, WANG Chao, <i>et al.</i> (1041)
Distribution Characteristics and Erosion Risk of Nitrogen and Phosphorus in Soils of Zhuangmu Town in Lake Wabuhu Basin	LI Ru-zhong, ZOU Yang, XU Jing-jing, <i>et al.</i> (1051)
Distribution and Risk Assessment of Mercury Species in Soil of the Water-Level-Fluctuating Zone in the Three Gorges Reservoir	ZHANG Cheng, CHEN Hong, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (1060)
Health Risk Assessment of Soil Heavy Metals in Residential Communities Built on Brownfields	CHEN Xing, MA Jian-hua, LI Xin-ning, <i>et al.</i> (1068)
Study on Ecological Risk Assessment Technology of Fluoride Pollution from Arid Oasis Soil	XUE Su-yin, LI Ping, WANG Sheng-li, <i>et al.</i> (1075)
Rainfall Process and Nitrogen Input in Three Typical Forests of Jinyun Mountain	SUN Su-qi, WANG Yu-jie, WANG Yun-qi, <i>et al.</i> (1081)
Effects of Land Use and Landscape Pattern on Nitrogen and Phosphorus Exports in Lanlingxi Watershed of the Three Gorges Reservoir Area, China	HAN Li-yang, HUANG Zhi-lin, XIAO Wen-fa, <i>et al.</i> (1091)
Changes and Influencing Factors of the Soil Organic Carbon in Farmland in the Last 30 Years on Hilly Loess Plateau; A Case Study in Zhuanglang County, Gansu Province	SHI Chen-di, XU Ming-xiang, QIU Yu-jie, <i>et al.</i> (1098)
Organic Carbon and Carbon Mineralization Characteristics in Nature Forestry Soil	YANG Tian, DAI Wei, AN Xiao-juan, <i>et al.</i> (1105)
Dynamic Change of Phosphorus Leaching of Neutral Purple Soil at Different Re-wetting Rate	ZHANG Si-lan, SHI Xiao-jun, GUO Tao (1111)
Effects of Thiourea on pH and Availability of Metal Ions in Acid Red Soil	YANG Bo, WANG Wen, ZENG Qing-ru, <i>et al.</i> (1119)
Growth Responses of Six Leguminous Plants Adaptable in Northern Shaanxi to Petroleum Contaminated Soil	SHAN Bao-qin, ZHANG Yong-tao, CAO Qiao-ling, <i>et al.</i> (1125)
Plant N Status in the Alpine Grassland of the Qinghai-Tibet Plateau; Base on the N:P Stoichiometry	ZHANG Ren-yi, XU Dang-hui, CHEN Ling-yun, <i>et al.</i> (1131)
Development and Succession of Artificial Biological Soil Crusts and Water Holding Characteristics of Topsoil	WU Li, CHEN Xiao-guo, ZHANG Gao-ke, <i>et al.</i> (1138)
Carbon Dioxide Assimilation Potential, Functional Gene Amount and RubisCO Activity of Autotrophic Microorganisms in Agricultural Soils	CHEN Xiao-juan, WU Xiao-hong, JIAN Yan, <i>et al.</i> (1144)
Dynamics of Microbes and Enzyme Activities During Litter Decomposition of <i>Pinus massoniana</i> Forest in Mid-subtropical Area	SONG Ying, GU Xi-rong, YAN Hai-yuan, <i>et al.</i> (1151)
Levels and Possible Sources of Organochlorine Pesticides (OCPs) in Camphor (<i>Cinnamomum camphora</i>) Tree Bark from Southern Jiangsu, China	ZHOU Li, ZHANG Xiu-lan, YANG Wen-long, <i>et al.</i> (1159)
Combined Stress of Enhanced UV-B Radiation and 1,2,4-Trichlorobenzene Contamination on the Growth of Green Vegetable	LIU Cui-ying, FAN Jian-ling, XU Xiang-hua (1164)
Effect of Ectomycorrhizae on Heavy Metals Sequestration by Thermostable Protein in Rhizosphere of <i>Pinus tabulaeformis</i> Under Cu and Cd Stress	ZHANG Ying-wei, CHAI Li-wei, WANG Dong-wei, <i>et al.</i> (1169)
Isolation and Characterization of a Halotolerant <i>p</i> -nitroaniline Degrading Strain S8	SONG Cai-xia, DENG Xin-ping, LI Tian, <i>et al.</i> (1176)
Optimized Cultivation of a Bioflocculant M-C11 Produced by <i>Klebsiella pneumoniae</i> and Its Application in Sludge Dewatering	LIU Jie-wei, MA Jun-wei, LIU Yan-zhong, <i>et al.</i> (1183)
Speciation Analysis of Lead Losses from Anthropogenic Flow in China	LIANG Jing, MAO Jian-su (1191)
Establishment and Application of Pollutant Discharge-Environment Quality Model	LI Ming-sheng, SUN Yuan, CHEN Yuan-hang, <i>et al.</i> (1198)
Advances in the Pathway and Molecular Mechanism for the Biodegradation of Microcystins	YAN Hai, WANG Hua-sheng, LIU Xiao-lu, <i>et al.</i> (1205)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2014年3月15日 35卷 第3期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 3 Mar. 15, 2014

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行