

叶祖鑫, 林 晨, 安艳玲, 等. 土地利用驱动下洪泽湖支流流域非点源颗粒态磷流失时空变化特征[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(4): 734–742.
YE Zu-xin, LIN Chen, AN Yan-ling, et al. Temporal and spatial distribution characteristics of NPS particulate phosphorus driven by land use in Hongze Lake tributary basin[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(4): 734–742.

土地利用驱动下洪泽湖支流流域非点源颗粒态磷流失时空变化特征

叶祖鑫^{1,2}, 林 晨^{2*}, 安艳玲¹, 吴起鑫¹, 刘 斌³, 隋雪艳³, 马荣华²

(1. 贵州大学喀斯特环境与地质灾害防治重点实验室, 贵阳 550003; 2. 中国科学院流域地理学重点实验室, 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008; 3. 江苏省土地开发整理中心, 南京 210017)

摘 要:选取洪泽湖支流流域, 根据 1990、2000、2005、2010 年 Landsat TM/ETM 遥感影像, 应用泥沙输移分布模型, 计算出研究区非点源颗粒态磷流失负荷, 研究土地利用变化对非点源颗粒态磷流失负荷的影响。结果表明, 土地利用与非点源颗粒态磷流失负荷息息相关: 在 2、3 号子流域, 建设用地、林地和颗粒态磷流失负荷呈正相关, 主要因为 2 号和 3 号子流域在盱眙及周边城市需求驱动下, 耕地由原来种植水稻转型为蔬菜等高附值经济作物, 种植强度较高, 磷肥施肥量增加, 造成颗粒态磷的流失负荷与当地建设用地和林地面积变化趋势相近; 4 号子流域由于土地类型转变, 造成旱地与颗粒态磷流失负荷呈负相关; 其他子流域大多为水田、旱地与颗粒态磷流失负荷呈正相关, 建设用地、林地和颗粒态磷流失负荷呈负相关。

关键词:颗粒态磷; 土地利用; 相关性; 泥沙输移分布模型

中图分类号: X524 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-2043(2017)04-0734-09 doi:10.11654/jaes.2016-1371

Temporal and spatial distribution characteristics of NPS particulate phosphorus driven by land use in Hongze Lake tributary basin

YE Zu-xin^{1,2}, LIN Chen^{2*}, AN Yan-ling¹, WU Qi-xin¹, LIU Bin³, SUI Xue-yan³, MA Rong-hua²

(1. Key Laboratory of Karst Environment and Geohazard Prevention, Guizhou University, Guiyang 550003, China; 2. Key Laboratory of Watershed Geographic Sciences, Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 3. Land Development and Consolidation Center of Jiangsu Province, Nanjing 210017, China)

Abstract: Land use changes greatly influence non-point source particulate phosphorus pollution. Here, the effect of land types changes non-point source particulate phosphorus pollution was studied based on remote sensing image (Landsat TM/ETM) in 1990, 2000, 2005 and 2010 using the method of sediment delivery-distribution model. The results showed: There was a close relationship between land use types and non-point source (NPS) particulate phosphorus load. In the region of NO.2 and NO.3 sub-basins, constructed land and forest had significant positive correlation with particulate phosphorus load. Driven by the demand of Xuyi and surrounding cities. The arable land which in NO.2 and NO.3 sub-basins were converted from the original cultivation of rice to vegetables and other high added value crops. For increasing application rate of phosphorus fertilizer, particulate phosphorus load increased which is close to the change trend of constructed land and forest. Dry land had negative correlation with particulate phosphorus load in NO.4 sub-basin, which is resulting of changing crop types. In the other sub-basins, mostly appearing that paddy field and dry land had significant positive correlation with particulate phosphorus load, but forest and constructed land reversed.

Keywords: particulate phosphorus; land use; correlation; SEDD model

收稿日期: 2016-10-27

作者简介: 叶祖鑫(1991—), 江苏南京人, 硕士研究生, 主要从事流域面源污染研究。E-mail: 244334038@qq.com

* 通信作者: 林 晨 E-mail: clin@niglas.ac.cn

基金项目: 国家自然科学基金面上基金项目(41671284)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China(41671284)

流域非点源条件下磷污染与载荷是水体富营养化的关键诱因,控制流域地表磷流失已经成为湖泊水环境管控的重要途径。磷在土壤中的存在按物理形态可以分为溶解态磷和颗粒态磷两大类,颗粒态磷以吸附在土壤胶体上的形态存在,可占总磷的 95%~99%^[1],所以流域内的磷流失往往是以颗粒态的形式输送至水体中。因此,有效地估算流域非点源颗粒态磷载荷时空变化特征是实现湖泊水环境保护的基础与依据。

传统的研究方法依赖于大量的点位观测以及小区径流试验,但流域污染物载荷存在极强的时空变异性,仅依靠点位监测难以准确获取流域尺度上的污染物分布信息。而现有模型通常被分为两类:物理模型(SWAT、ANSWERS 和 AGNPS 等)和经验模型(RUSLE、SEDD 和 PLOAD 等)^[2-5]。物理模型在较小的空间尺度上对污染流失有准确的估计,但因需要详细的野外观察数据,使得这些模型不适用于大的空间尺度^[6-7]。而经验模型被广泛用于流域监测,因其具有结构简单、资料易于获取和高效等优点^[8],所以本文选用经验模型进行研究。目前,经验模型多使用修正通用水土流失方程 RUSLE(Revised universal soil loss equation),它基于气候、土地利用、土壤、地形、植被覆盖等因素,估算流域内土壤侵蚀模数^[9]。本文所采用的泥沙输移分布模型 SEDD(Sediment delivery distributed model)已在 RUSLE 方程的基础上进行了改进,由于引入了泥沙输移比和土壤中磷含量,可以更精确地估算土壤中颗粒态营养物质的流失。同时,遥感影像和 GIS 技术的应用,可以获取流域尺度上长时间序列的动态数据,解决过去模型缺乏有效的实时监测数据,难以模拟流域尺度上非点源污染时空变化的问题^[10-11]。

在经验模型对非点源颗粒态磷的计算过程中,非点源污染受降雨、地形、土地利用、土壤性质、水文过程及人类活动等因素影响。土地利用变化是社会经济条件下人类活动的集中体现,土地利用变化会使得下垫面的土壤成分、水质特征、水文过程等发生变化,从而直接或间接影响非点源污染的全过程^[12-13]。

本文选择洪泽湖流域为研究区,采用 SEDD 经验模型,运用卫星遥感与地面采样监测相搭配的星地协同技术,获取洪泽湖流域非点源颗粒态磷流失的时空变化,并讨论它与土地利用变化之间的响应关系。既可以为流域水环境监测和预警提供数据支撑,还可以为流域生态环境保护提出建议。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于洪泽湖入湖河流淮河(盱眙段)周边,118°21'~118°36'E,32°51'~33°7'N,流域面积 175.4 km²。研究区地势西南多丘陵,东北多平原,呈阶梯状倾斜,高低相差 200 m,空间差异较大。研究区地处亚热带和暖温带过渡气候区,四季分明,年平均气温 14.7℃、平均降雨量为 1005 mm,降雨多集中在 7—9 月份,占全年降雨量的 60%左右。研究区土壤类型主要为黄岗土、粘棕土、暗栗土等,土地利用类型为林地、水田、旱地、建设用地、湿地、水体等。

1.2 子流域划分

在流域数字高程模型(DEM)的基础上,结合流域的实际水系及产汇流特征,SWAT 模型将流域划分为十多个子流域,选取其中地类、地形特征明显的 5 块子流域作为研究区,如图 1 所示。

1.3 非点源颗粒态磷流失负荷定量评价

SEDD 模型在传统研究使用的修正通用水土流失方程 RUSLE 的基础上,将土壤中磷含量和泥沙输移比引入模型中,并且在 30 m×30 m 的空间尺度下进行计算^[14]。

$$Par(P)=A_i \times P_{sed} \times SDR_i \times 0.01 \quad (1)$$

式中: $Par(P)$ 指单位面积颗粒态磷负荷,kg·km⁻²·a⁻¹; A_i 指土壤侵蚀模数,t·hm⁻²·a⁻¹; P_{sed} 指土壤中的总磷含量,g·kg⁻¹; SDR_i 指泥沙输移比,% ,可以通过模型(2)进行计算^[15-19]。

$$SDR_i = (1-K') \frac{\ln(\alpha/\tan \beta)}{\ln(\alpha/\tan \beta)_{\max}} \quad (2)$$

$$K' = \begin{cases} 0.36 & \beta < 5^\circ \\ 0.30 & 5^\circ \leq \beta < 10^\circ \\ 0.24 & 10^\circ \leq \beta < 15^\circ \\ 0.18 & 15^\circ \leq \beta < 20^\circ \\ 0.12 & 20^\circ \leq \beta < 25^\circ \\ 0.03 & \beta \geq 25^\circ \end{cases}$$

式中: K' 指阻力截留系数, α 为流经坡面任一点*i*处单位等高线长度的汇流面积, β 为该点处的坡度。

1990 年和 2000 年磷背景数据通过查找土壤志相应土种的磷背景值进行赋值,栅格化;2005 年与 2010 年磷背景数据通过地调院多目标地球化学数据,利用反距离权重法进行插值为栅格图,相对误差为 0.125。

通过修正通用水土流失方程 RUSLE 计算土壤侵

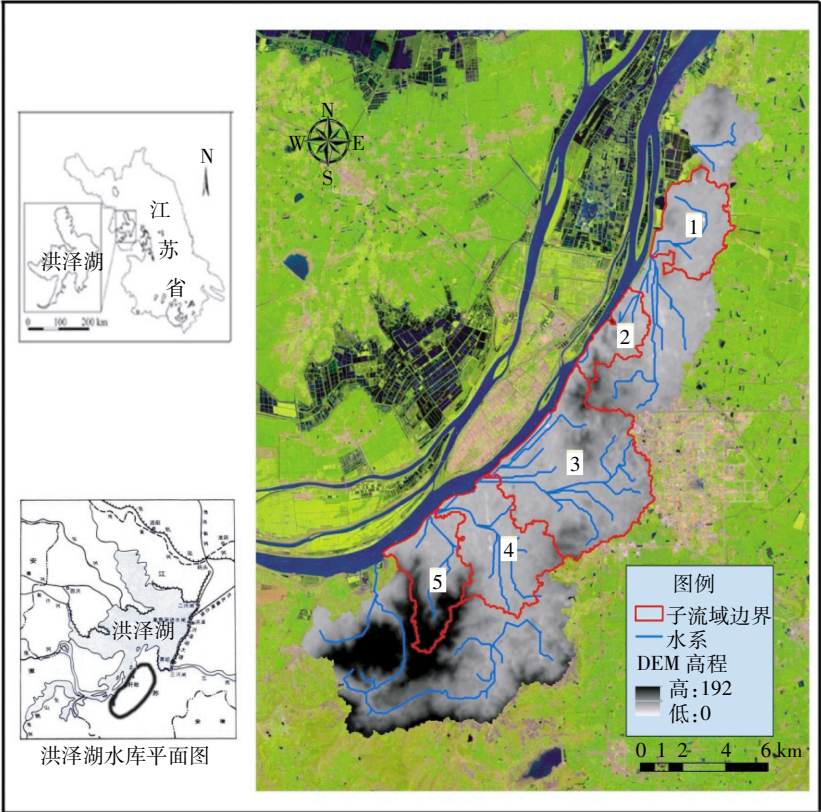


图 1 研究区示意图

Figure 1 Location of study area

蚀模数。

$$A_i=R_i\times K_i\times LS_i\times C_i\times P_i \tag{3}$$

式中： A_i 为年土壤侵蚀量， $t\cdot hm^{-2}\cdot a^{-1}$ ； R_i 为降雨侵蚀动力因子， $MJ\cdot mm\cdot hm^{-2}\cdot a^{-1}$ ； K_i 为土壤可蚀性因子， $Mg\cdot h\cdot MJ^{-1}\cdot mm^{-1}$ ； LS_i 为坡长坡度因子； C_i 为植被覆盖和作物管理因子； P_i 为水土保持措施因子， LS_i 、 C_i 、 P_i 均为无量纲因子。

降雨侵蚀动力因子 R 通过模型(4)进行计算^[20]。

$$R=\sum_{i=1}^{12}1.735\times10^{[1.5\times\lg(\frac{P_i^2}{P})-0.8188]} \tag{4}$$

式中： P_i 为月平均降雨量，mm； P 为年平均降雨量，mm。

土壤可蚀性因子指对某一特定土壤内在可蚀性的定量化描述，本文采用 Sharpley 等^[21]推出的仅需要土壤质地以及有机碳含量数据的土壤可蚀性因子 K 计算公式计算得出。 LS 因子反映地形对土壤侵蚀的影响，它包括坡长和坡度因素，利用 ARCGIS 软件基于 30 m 分辨率的 DEM 图计算得出流域坡长、坡度空间分布图；再通过公式(5)分别算出 L 和 S 因子^[22-23]。

$$L=(\mu/22.13)^m$$

$$m=\begin{cases} 0.2 & \theta<0.5^{\circ} \\ 0.3 & 0.5^{\circ}\leq\theta<1.5^{\circ} \\ 0.4 & 1.5^{\circ}\leq\theta<3.0^{\circ} \\ 0.5 & \theta\geq3.0^{\circ} \end{cases}$$
$$S=\begin{cases} 10.8\sin(\theta)+0.03 & \theta\leq5^{\circ} \\ 16.8\sin(\theta)+0.5 & 5^{\circ}<\theta\leq10^{\circ} \\ 21.9\sin(\theta)+0.03 & \theta>10^{\circ} \end{cases} \tag{5}$$

式中： θ 表示坡度； μ 表示坡长，m。

水土保持 P 因子是指特定保持措施条件下的土壤流失量与相应未实施保持措施情况下地块土壤流失量之比。 P 值一般在 0~1 之间。本次研究参考相关学者的研究结果^[24]，确定研究区不同土地利用类型的 P 值见表 1，将 P 值赋给不同的土地利用类型，得到 P 因子图。

植被覆盖与管理因子 C 是评价植被因素抵抗土壤侵蚀能力及准确估算土壤侵蚀模数的重要参数，

表 1 不同土地利用类型的 P 因子值

Table 1 P Value of different land utilization type

土地利用类型	水田	旱地	建设用地	湿地	草地	未利用地	水体
P 值	0.2	0.5	0	1	0.9	1	0

通过归一化植被指数 NDVI 来进行计算^[25],见公式(6)。NDVI 指数是一种由遥感传感器所接收的地物光谱信息而推算得到的反映地表植被状况的定量值。本次计算利用 Landsate TM 影像经过辐射定标、大气校正、波段计算求得月 NDVI 值,以月 NDVI 值求平均,获得 NDVI 数据的年度值。这样可以准确反映一年中研究区植被覆盖的平均情况,缩小季节变化的影响^[26]。

(1)植被覆盖度 c

$$c=(\frac{NDVI-NDVI_{min}}{NDVI_{max}-NDVI_{min}})^2$$

(2)植被覆盖与管理因子 C

$$C=0.650\ 8-0.343\ 6l\lg c \tag{6}$$

1.4 数据收集

土壤中总磷含量 P_{sed} 的基础数据和非点源颗粒态磷流失负荷计算模型中各因子空间数据(降雨量、植被覆盖度等)来源见表 2。

1.5 模型验证

由于缺少实测的颗粒态磷负荷数据,本文采用年输水量与实测水样中的颗粒态磷浓度推算得到颗粒态磷负荷量,将之与模型估算的颗粒态磷负荷进行对比,验证模型估算精度^[27]。径流量来自于南京地理与湖泊研究所 2010 年对 1、3、4 号子流域出水口的定点径流量监测数据。实测的颗粒态磷浓度数据通过 2010 年对 1、3、4 号子流域出水口采集的不同季节的水样,采用钼酸铵分光光度法测定而得。

验证结果如表 3 所示。2010 年,1 号子流域的相对误差最大,为 12.26%;4 号子流域的相对误差最小,为 8.4%。模拟结果表明所建立的非点源颗粒态磷流失模型具有一定的模拟精度。

表 3 不同子流域颗粒态磷流失量模拟值与实际值对比分析
Table 3 Comparison between calculated and measured particulate phosphorus loss load

子流域	年份	颗粒态磷流失量/ $t\cdot a^{-1}$		相对误差/%
		实际值	模拟值	
1	2010	0.72	0.63	-12.26
3	2010	9.23	8.38	-9.23
4	2010	1.18	1.08	-8.4

2 结果与讨论

2.1 研究区土地利用变化情况

研究区土地利用类型主要分为六类,计算和统计结果见图 2~图 4。从图 2 和图 3 可以看出,研究区整体土地利用结构表现为水田面积比例最大,在 34%~40%之间,其他地类面积比例在 20%以下。变化最快的是建设用地,1990—2010 年增加了接近 80%的用地量;林地和旱地面积比例变化不快。

各子流域土地利用结构如图 4 所示。1 号子流域水田面积较大,占子流域总面积的 50%;2 号和 3 号子流域位于盱眙县郊区,随着经济快速发展,城镇化效应显著,近 20 年来建设用地面积分别增长了 40%和 105%,水田面积分别减少了 25%和 50%;4 号子流域大部分面积位于丘陵地带,和 1 号子流域一样以水田面积居多,占 60%以上;5 号子流域也位于丘陵地带,林地面积相比其他子流域最多,达到 30%,水田、旱地面积比例在 20%~30%之间。

2.2 非点源颗粒态磷的时空分布特征

采用 SEDD 经验模型估算方法,计算得到洪泽湖支流流域非点源颗粒态磷流失负荷如图 5 和表 4 所示。

表 2 非点源磷流失负荷计算数据来源
Table 2 The data source for NPS P loads calculation

数据种类	数据源	描述
遥感影像	Landsate4-STM 和 Landsate8OLI	数据从美国地质勘探局网站(USGS)获取,空间精度为 30 m,NDVI 值从影像波段计算得出,再通过 NDVI 值计算得出植被覆盖和管理因子 C 。同时对影像进行非监督分类,得到土地利用类型图(图 2)
土壤类型	江苏省土壤类型图	数据来源于电子版的土壤类型分类图,土壤侵蚀因子 K 值是基于土壤类型图赋值得到
数字高程图	地理空间数据云	数据来源于地理空间数据云,空间精度是 30 m,坡长坡度因子(LS)是通过坡长和坡度空间数据计算得出的
降雨量	洪泽湖流域气象监测站	研究区有 3 个气象监测站,通过气象监测站获得研究年份的月降雨量数据,用内插值法做出对应年份的流域月降雨量分布图,利用月降雨量分布栅格图、计算公式;通过栅格计算器算出流域降雨侵蚀因子 R
土壤中磷背景值	2002 年出版《江苏省土壤志》, 2005—2010 年地调院多目标地球化学数据	土壤 P_{sed} 含量($g\cdot kg^{-1}$),有机质含量($g\cdot kg^{-1}$),砂粒、粉粒、粘粒含量(%)

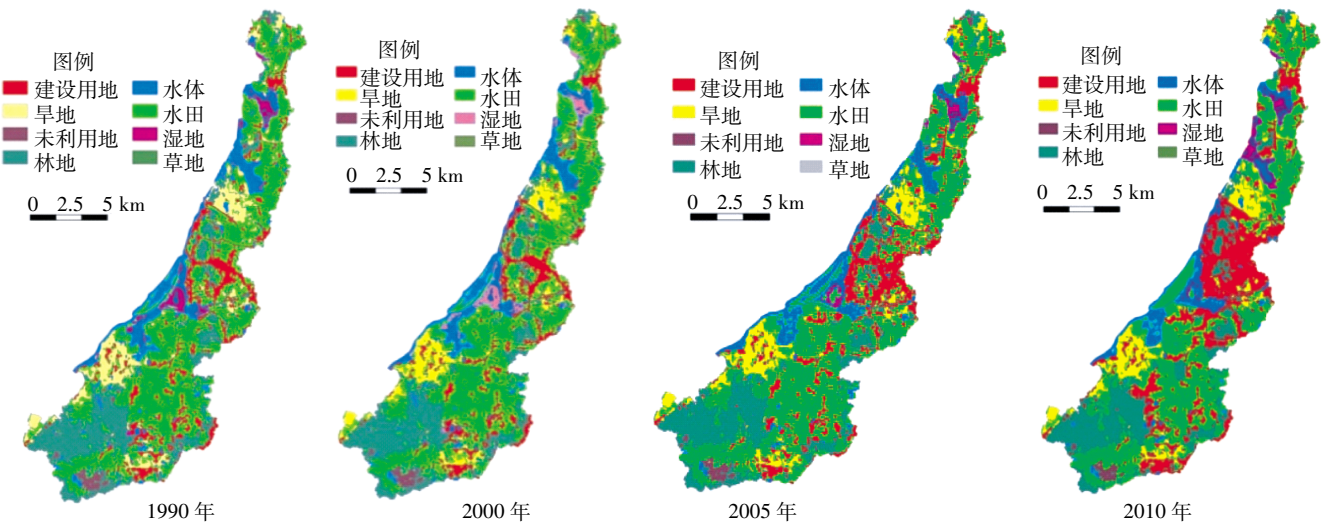


图 2 1990—2010 年研究区土地利用情况示意图
Figure 2 Land use of study area from 1990 to 2010

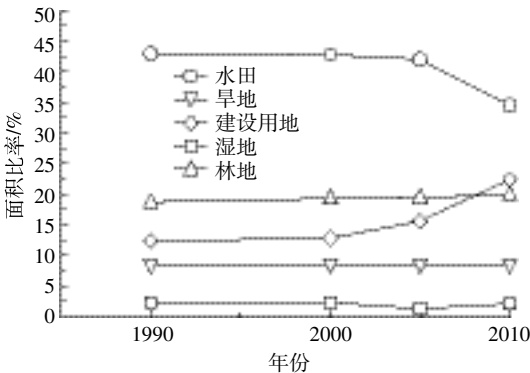


图 3 1990—2010 年研究区土地利用变化
Figure 3 Land use change of study area from 1990 to 2010

由图 5 和表 4 可知,1990—2010 年,全流域颗粒态磷流失量及流失负荷出现先增后减的趋势,在 2000 年达到较高值,流失量为 $117.51 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$,流失负荷为 $0.67 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。各子流域间,1 号、4 号和 5 号子流域颗粒态磷流失负荷逐渐降低,2 号和 3 号子流域流失负荷逐渐增加。

表 4 各子流域非点源颗粒态磷流失负荷
Table 4 NPS particulate P loads in each sub-basin

子流域	面积/ km^2	流失负荷/ $\text{t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$			
		1990 年	2000 年	2005 年	2010 年
1	12	0.08	0.09	0.05	0.05
2	6.49	0.48	0.48	0.91	0.90
3	36	0.21	0.22	0.24	0.23
4	19	0.13	0.13	0.05	0.06
5	13	1.15	1.2	0.44	0.51
全流域	175.36	0.62	0.67	0.36	0.4

空间上,1 号、3 号和 4 号子流域颗粒态磷流失负荷低于 $0.25 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,2 号和 5 号子流域流失负荷相对较高,大于 $0.44 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。3 号与 5 号子流域的颗粒态磷流失量较高:3 号子流域占地面积 36 km^2 ,面积比率为 20.5%,研究期间对研究区颗粒态磷流失总量的贡献率在 7%~14%之间;5 号子流域占地面积为 13 km^2 ,面积比率为 7%,研究期间对研究区颗粒态磷流失总量的贡献率在 9%~13.7%之间。

2.3 非点源颗粒态磷流失负荷与土地利用之间的关系
同一子流域不同年份土地利用类型比例与颗粒态磷流失负荷相关关系见表 5。

1 号子流域主要土地类型为水田,占子流域总面积的 50%左右,其水田、旱地和颗粒态磷流失负荷呈正相关,林地和颗粒态磷流失负荷呈负相关。曾立雄等^[28]研究发现,三峡库区兰陵溪小流域农田磷流失负荷要远远高于其他几种地类;欧阳威等^[29]对巢湖区域 1996—2012 年期间不同土地利用类型面源磷流失负荷进行研究,发现水田、旱地流失负荷最大,草地、林

表 5 土地利用类型与颗粒态磷流失负荷相关系数
Table 5 Correlation coefficients between NPS particulate P loads and land use types

	子流域	旱地	水田	建设用地	湿地	林地
颗粒态磷	1	0.63	0.70	-0.93*	0.38	-0.99**
	2	0.11	-0.94*	0.95*	0.99*	0.96*
	3	0.05	-0.21	0.14	0.21	0.23
	4	-0.96*	0.54	-0.92*	—	-0.67
	5	0.28	0.58	-0.74	—	-0.98**

注:* 表示 $P < 0.05$, ** 表示 $P < 0.01$ 。

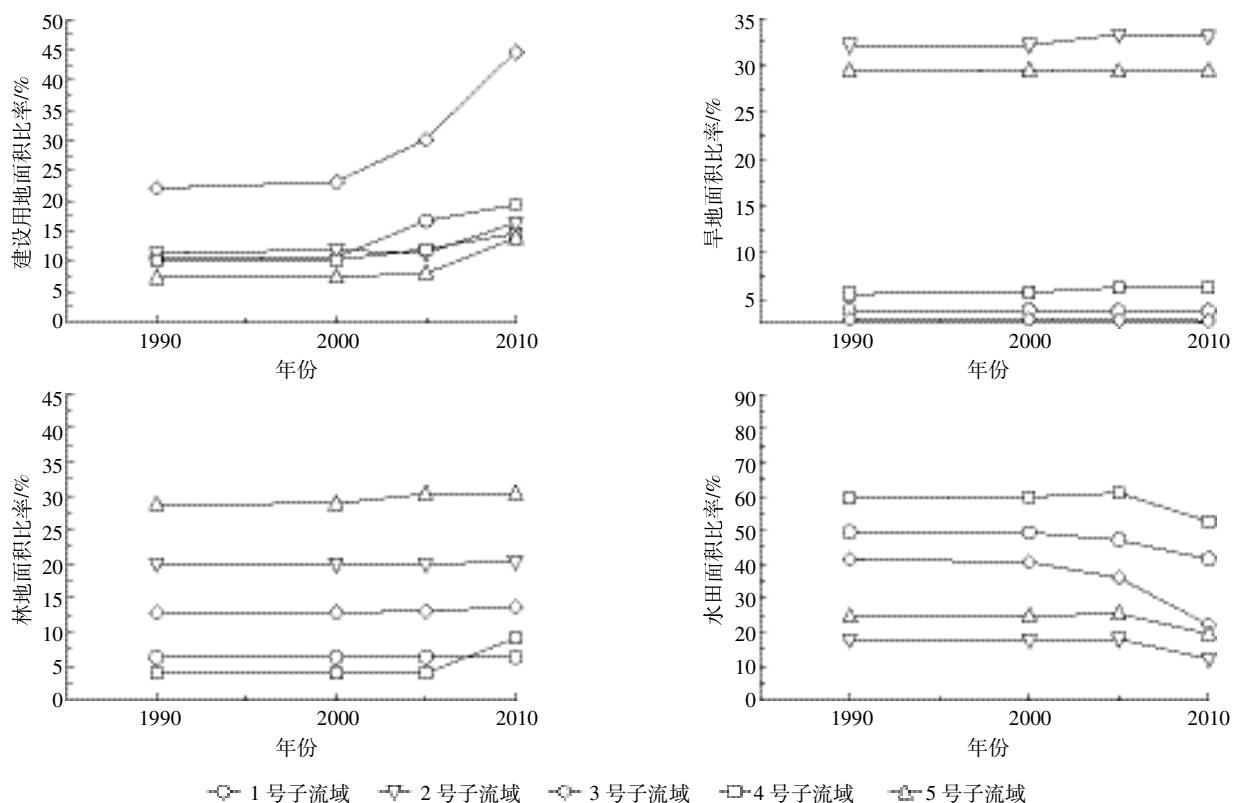


图4 1990—2010年各子流域土地利用变化

Figure 4 Land use changes in buffer zones from 1990 to 2010

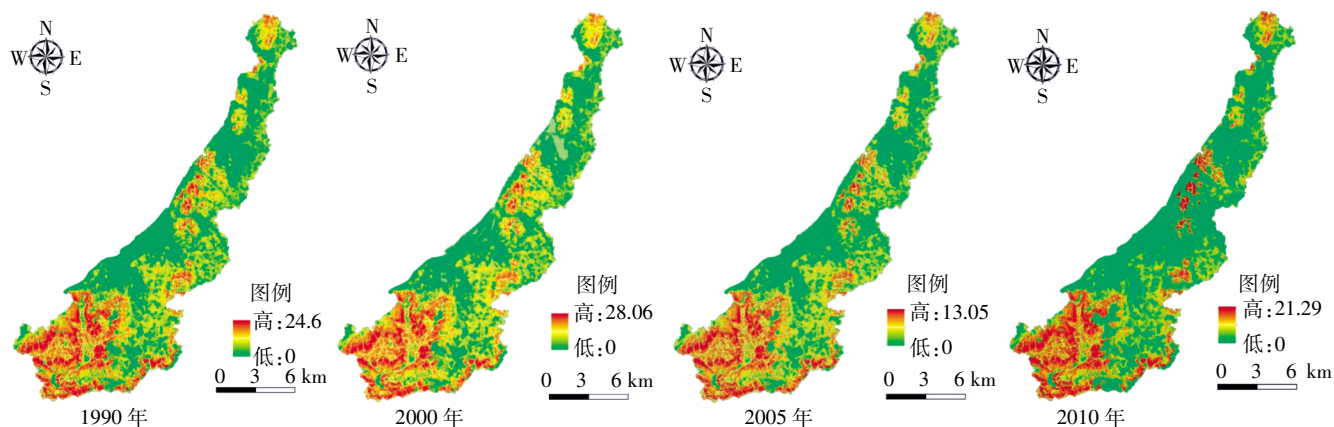


图5 1990—2010年研究区非点源颗粒态磷流失负荷空间分布图

Figure 5 The spatial distribution of NPS particulate P loads from 1990 to 2010

地次之。可见,水田和旱地在降雨过程中土壤中的营养物质容易随着径流流失,相应的磷流失负荷较大,而林地的水土保持能力相对较好,降雨截留作用明显^[30],表明相同面积下林地的磷流失负荷要低于水田和旱地。

与其他子流域不同,在2号和3号子流域中,建设用地和林地与颗粒态磷流失量呈正相关,原因主要来自两方面。一方面随着我国经济迅猛发展,城市人

口大幅度增加,2号和3号子流域位于盱眙郊区,在盱眙及周边城市需求驱动下,城市周边农田由原来种植水稻转型为蔬菜等高附加值经济作物,并且蔬菜多季节种植,种植强度高。资料显示1998—2006年期间,盱眙县蔬菜播种总面积从0.87万 hm^2 增加到1.41万 hm^2 ^[31-32],可见蔬菜播种面积快速增长。沈连峰等^[33]在河南省淮河流域采集了降雨期间不同土地利用类型下的地表径流,实验结果表明,蔬菜地径流总磷

浓度为 $4.98 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,水稻田径流总磷浓度为 $1.51 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,蔬菜地的磷流失量是水稻田的3倍以上;向速林等^[34]采集了赣江下游流域蔬菜和水田等土地利用类型的降雨径流,实验结果显示蔬菜地的总磷和磷酸盐的浓度分别是水田的2.2倍和2.9倍。可见,农田种植作物的变化会产生更多的磷流失量,因此2号和3号子流域虽然农田面积降低,但是颗粒态磷流失量反而增加。另一方面,由于2、3号子流域位于城市周边,经济发展及城市绿化促使建设用地面积和人工林面积逐渐增加,同时子流域中颗粒态磷流失量也在逐年增加,所以出现了建设用地、林地与颗粒态磷流失量呈正相关的现象。

4号和5号子流域的丘陵水田面积较大,丘陵地区较大的地势高差和较强的降水会导致该区域水土流失严重^[35]。张韶华^[36]研究表明,当 15° 以上的草地、林地改为耕地时,总磷的流失负荷增加了89%;将 15° 以上的耕地和裸地全部转化为林地时,总磷的流失负荷减少23%。由此可知耕地相对林地和裸地而言,更容易发生水土流失,造成泥沙和土壤中的磷素输出至水体,出现仅有耕地与颗粒态磷呈正相关的现象。由于河桥镇黄龙村大量植树造林活动^[37],引起水田面积明显下降,林地面积增加(图4),造成颗粒态磷流失量降低,同时旱地面积占比仅为5%~6.3%,受到植树造林活动的影响较小,面积缓慢增长,与颗粒态磷流失量变化趋势相反,故4号子流域出现旱地与颗粒态磷流失量呈负相关的现象。

3 结论

(1)研究区水田面积比例最大,范围在34%~40%;建设用地面积增长最快,研究期间增长了80%。各子流域中,处于城市周边的2号、3号子流域建设用地增长最快,4号与5号子流域处于丘陵地带,坡度、林地面积相对其他子流域较大。

(2)研究区在2000年时颗粒态磷流失负荷最大,为 $0.67 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,各子流域间,1号、3号和4号子流域颗粒态磷流失负荷低于 $0.25 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,2号和5号子流域流失负荷相对较高,大于 $0.44 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。3号与5号子流域的颗粒态磷流失量较高,研究期间对研究区颗粒态磷流失量的贡献率分别为7%~14%和9%~13.7%。

(3)盱眙县城周边的2号和3号子流域,建设用地、林地与颗粒态磷流失负荷呈正相关,主要因为耕地利用方式由种植水稻转向种植蔬菜,带来更多的颗

粒态磷流失负荷,与建设用地和林地面积增长趋势相符。4号子流域受到大量植树造林活动的影响,颗粒态磷流失负荷明显下降,与呈现缓慢增长的旱地面积表现为负相关。其他子流域多为旱地、水田与颗粒态磷流失负荷呈正相关,林地、建设用地与颗粒态磷流失负荷呈负相关。

致谢:感谢中国科学院南京地理与湖泊研究所“湖泊-流域科学数据共享平台”提供的洪泽湖流域、土地利用、气象等数据。感谢贵州大学喀斯特重点实验室对数据分析提供的帮助。感谢中国科学院南京地理与湖泊研究所“湖泊环境遥感团队”熊俊峰、闵敏等在样点采集集中提供的帮助。在此一并致谢!

参考文献:

- [1] 王晓峰,任志远. 近14年榆林北六县土地利用变化及驱动力分析[J]. 水土保持研究, 2006, 13(6):201-203.
WANG Xiao-feng, REN Zhi-yuan. Analysis of land use change and driving force in wind drift sand region: A case study of Shenmu County[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2006, 13(6):201-203.
- [2] Beasley D B, Huggins L F, Monke E J. ANSWERS: A model for watershed planning[J]. *Transactions of the ASAE*, 1980, 23(4):938-944.
- [3] Wang H, Zhang W, Song H, et al. Spatial evaluation of complex non-point source pollution in urban-rural watershed using fuzzy system[J]. *Journal of Hydroinformatics*, 2014, 16(1):114-129.
- [4] Gburek W J, Sharpley A N. Hydrologic controls on phosphorus loss from upland agricultural watersheds[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1998, 27(2):267-277.
- [5] Shen Z Y, Hong Q, Chu Z, et al. A framework for priority non-point source area identification and load estimation integrated with APPI and PLOAD model in Fujian Watershed, China[J]. *Agricultural Water Management*, 2011, 98(6):977-989.
- [6] Medowell R W, Sharpley A N, Chalmers A T. Land use and flow regime effects on phosphorus chemical dynamics in the fluvial sediment of the Winooski River, Vermont[J]. *Ecological Engineering*, 2002, 18(4):477-487.
- [7] Bechmann M, Staltnacke P, Kvoerno 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.
- [8] He B, Kanae S, Oki T, et al. Assessment of global nitrogen pollution in rivers using an integrated biogeochemical modeling framework[J]. *Water Research*, 2011, 45(8):2573-2586.
- [9] Terranova O, Antronico L, Coscarelli R, et al. Soil erosion risk scenarios in the Mediterranean environment using RUSLE and GIS: An application model for Calabria (Southern Italy)[J]. *Geomorphology*, 2009, 112(3/4):228-245.
- [10] Fu G, Chen S, McCool D K. Modeling the impacts of no-till practice on soil erosion and sediment yield with RUSLE, SEDD, and ArcView GIS[J]. *Soil & Tillage Research*, 2006, 85(1):38-49.
- [11] Jain M K, Kothiyari U C. Estimation of soil erosion and sediment yield using GIS[J]. *Hydrological Sciences Journal*, 2000, 45(5):771-786.

- [12] 乔敦. 三峡库区紫色土坡耕地吸附态氮磷污染负荷模拟研究[D]. 重庆:重庆大学, 2012.
QIAO Dun. Study on simulation of absorbed nitrogen and phosphorus quantity of slope farmland with purple in Three Gorges reservoir area[D]. Chongqing: Chongqing University, 2012.
- [13] 韩赵钦. 基于SWAT模型的滇池流域不同土地利用配置下的非点源污染研究[D]. 武汉:华中农业大学, 2013.
HAN Zhao-qin. Research on non-point source pollution caused by land use allocation of Dianchi watershed based on SWAT model[D]. Wuhuan: Huazhong Agricultural University, 2013.
- [14] Cui G. Quantitative evaluation of nonpoint pollution of Taihu watershed using geographic information system[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2003, 15(3):236-244.
- [15] Sheridan J M, Lowrance R, Bosch D D. Management effects on runoff and sediment transport in riparian forest buffers[J]. *Transactions of the ASAE*, 1999, 42(1):55-64.
- [16] Daniels R B, Gilliam J W. Sediment and chemical load reduction by grass and riparian filters[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1996, 60(1):246-251.
- [17] 吴楠, 苏德毕力格, 高吉喜, 等. 基于格局和过程的流域生态系统减轻入库泥沙服务及价值:以雅砻江二滩水库为例[J]. 中国环境科学, 2011, 31(10):1751-1760.
WU Nan, SUDE Bilige, GAO Ji-xi, et al. Evaluation of a watershed ecosystem service for avoiding reservoir sedimentation and its economic value based on pattern and process: A case study from Ertan reservoir in Yalong River[J]. *China Environmental Science*, 2011, 31(10):1751-1760.
- [18] 赵新峰, 陈利顶, 杨丽蓉, 等. 基于水流路径与景观单元相互作用的非点源污染模拟研究[J]. 环境科学学报, 2010, 30(3):621-630.
ZHAO Xin-feng, CHEN Li-ding, YANG Li-rong, et al. Modeling non-point pollution based on interactions between flow path and landscape units[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2010, 30(3):621-630.
- [19] 潘成忠, 上官周平. 不同坡度草地含沙水流力学特性及其拦沙机理[J]. 水科学进展, 2007, 18(4):490-495.
PAN Cheng-zhong, SHANGGUAN Zhou-ping. Sediment-laden flow characteristics and sediment suppression mechanism of different slope [J]. *Advances in Water Science*, 2007, 18(4):490-495.
- [20] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning[M]//United states dept. of agriculture. agriculture handbook. 1978, 537.
- [21] Sharpley A N, Williams J R. EPIC-erosion/productivity impact calculator: 1. Model documentation[J]. *Technical Bulletin-United States Department of Agriculture*, 2010, 4(4):206-207.
- [22] McCool D K, Brown L C, Foster G R, et al. Revised slope steepness factor for the universal soil loss equation[J]. *Transactions of the ASAE*, 1987, 30(5):1387-1396.
- [23] Onyando J O, Kisoyan P, Chemelil M C. Estimation of potential soil erosion for river Perkerra catchment in Kenya[J]. *Water Resources Management*, 2005, 19(2):133-143.
- [24] 赵磊, 袁国林, 张琰, 等. 基于GIS和USLE模型对滇池宝象河流域土壤侵蚀量的研究[J]. 水土保持通报, 2007, 27(3):42-46.
ZHAO Lei, YUAN Guo-lin, ZHANG Yan, et al. The amount of soil erosion in Baoxiang watershed of Dianchi Lake based on GIS and USLE[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2007, 27(3):42-46.
- [25] Durigon V L, Carvalho D F, Antunes M A H, et al. NDVI time series for monitoring RUSLE cover management factor in a tropical watershed[J]. *International Journal Remote Sensing*, 2014, 35(2):441-453.
- [26] 杨绍镠, 谭裕模, 胡钧铭. 基于NDVI的广西近十年植被变化特征分析[J]. 南方农业学报, 2012, 43(11):1783-1788.
YANG Shao-e, TAN Yu-mo, HU Jun-ming. Analysis of Guangxi vegetation variation characteristics during recent decade based on NDVI[J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2012, 43(11):1783-1788.
- [27] 臧玉珠, 林晨, 金志丰, 等. 土地利用变化下沿海地区吸附态磷负荷动态变化研究[J]. 长江流域资源与环境, 2016, 25(7):1093-1102.
ZANG Yu-zhu, LIN Chen, JIN Zhi-feng, et al. Research on the dynamic change of absorbed phosphorus load under land use change background in the coastal areas[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2016, 25(7):1093-1102.
- [28] 曾立雄, 肖文发, 黄志霖, 等. 三峡库区兰陵溪小流域养分流失特征[J]. 环境科学, 2013, 34(8):3035-3042.
ZENG Li-xiong, XIAO Wen-fa, HUANG Zhi-lin, et al. Characteristics of nutrient loss of Lanlingxi watershed in the Three Gorges reservoir area[J]. *Environmental Science*, 2013, 34(8):3035-3042.
- [29] 欧阳威, 黄浩波, 蔡冠清. 巢湖地区无监测资料小流域面源磷污染输出负荷时空特征[J]. 环境科学学报, 2014, 34(4):1024-1031.
OUYANG Wei, HUANG Hao-bo, CAI Guan-qing. Temporal and spatial characteristics of diffuse phosphorus pollution in the watershed without monitoring data at Chaohu Lake[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, 34(4):1024-1031.
- [30] 曾赞, 魏琳. 川中紫色丘陵区径流泥沙SWAT模型的模拟应用分析[J]. 地球信息科学学报, 2013, 15(3):401-407.
ZENG Yun, WEI Lin. Simulation and application of SWAT model for runoff and sediment in purple hilly area[J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2013, 15(3):401-407.
- [31] 袁长兵, 谷文书, 邱学荣. 盱眙县蔬菜产业现状与发展对策[J]. 吉林蔬菜, 2007(4):80-81.
YUAN Chang-bing, GU Wen-shu, QIU Xue-rong. Present situation and development countermeasures of vegetable industry in Xuyi County [J]. *Jilin Vegetables*, 2007(4):80-81.
- [32] 赵培勤, 于文化. 盱眙蔬菜产业适度规模经营调查[J]. 江苏农村经济, 2010(5):30.
ZHAO Pei-qin, YU Wen-hua. Investigation on moderate scale operation of vegetable industry[J]. *Jiangsu Rural Economy*, 2010(5):30.
- [33] 沈连峰, 苗蕾, 韩敏, 等. 河南省淮河流域不同土地利用类型氮磷流失的特征分析[J]. 水土保持学报, 2012, 26(4):77-80.
SHEN Lian-feng, MIAO Lei, HAN Min, et al. Characteristics analysis of nitrogen and phosphorus loss about different land use types of Huaihe River basin in Henan Province[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, 26(4):77-80.
- [34] 向速林. 赣江流域农田地表径流氮磷迁移与流失研究[J]. 生态环境学报, 2013, 22(7):1204-1207.
XIANG Su-lin. Study on the movement and loss of nitrogen and phosphorus in surface runoff of farmland in Ganjiang river basin[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2013, 22(7):1204-1207.
- [35] 李恒鹏, 刘晓玫, 黄文钰. 太湖流域浙西区不同土地类型的面源污

染产出[J]. 地理学报, 2004, 59(3):401-408.

LI Heng-peng, LIU Xiao-mei, HUANG Wen-yu. Non-point source pollution output of different land types in the west of Taihu Lake[J]. *Geographica Sinica*, 2004, 59(3):401-408.

[36] 张韶华. 基于 GIS 与 SWAT 模型的滇池流域不同坡度下土地利用/覆被变化对农业非点源污染的影响研究[D]. 昆明: 云南师范大学, 2014.

ZHANG Shao-hua. Effects of land use and land cover change on agri-

cultural non-point source pollution at different slopes in Dianchi Lake basin based on GIS and SWAT model[D]. Kunming: Yunnan Normal University, 2014.

[37] 姜采蓝, 袁孝春, 李光明. 盱眙: 真金白银绿化造林[N]. 淮安日报, 2014-03-28B01.

JIANG Cai-lan, YUAN Xiao-chun, LI GUANG-ming. Xuyi: Real money and afforestation[N]. Huaian Daily, 2014-03-28B01.



固体废物预处理与分选技术(第二版)

边炳鑫、张鸿波、赵由才 主编

本书全面论述固体废物处理和分选的原理与技术, 具体内容包括固体废物的分类、收集与管理, 固体废物的压实、破碎、筛分、分选、固体废物的稳定化/固化及典型固体废弃物的资源化处理等内容。

※书号: 9787122275332

※定价: 85.0 元

※开本: 16

※出版日期: 2017 年 3 月



固体废物堆肥原理与技术(第二版)

赵天涛、梅娟、赵由才 主编

本书是《固体废物处理与资源化丛书》中的一分册, 内容共分为 11 章, 主要介绍了固体废物简述、固体废物堆肥原理、固体废物堆肥工艺、堆肥过程的物料和能量衡算、有机无机复混肥生产工艺、堆肥的过程控制、堆肥腐熟度评价、堆肥设备、堆肥质量标准与应用、堆肥在控制污染等领域的应用、堆肥系统及运行。书中结合典型实例介绍, 对实际工程设计和运行管理有指导作用。

※书号: 9787122280237

※定价: 68.0 元

※开本: 16

※出版日期: 2017 年 3 月



固体废物焚烧技术(第二版)

张弛、柴晓利、赵由才 主编

本书共分八章, 内容包括固体废物的特征、固体废物处理处置技术概述、固体废物焚烧技术基本原理、固体废物焚烧的政策及项目规划、生活垃圾焚烧技术概述、生活垃圾焚烧工艺、生活垃圾焚烧厂设备, 以及危险废物焚烧处理等。

※书号: 9787122279859

※定价: 80.0 元

※开本: 16

※出版日期: 2017 年 3 月

如需更多图书信息, 请登录 www.cip.com.cn

服务电话: 010-64518888, 64518800(销售中心)

网上购书可登录化学工业出版社天猫旗舰店: <http://hxgyebs.tmall.com>

邮购地址: (100011) 北京市东城区青年湖南街 13 号 化学工业出版社

如要出版新著, 请与编辑联系, 联系电话: 010-64519525。