

丹江口水库新增淹没区农田土壤潜在风险评估

王 剑¹,尹 炜²,赵晓琳¹,仰 满¹,段 诚¹,朱 惇²,史志华^{1*} (1.华中农业大学资源与环境学院,湖北 武汉 430070; 2.长江水资源保护科学研究所,湖北 武汉 430051)

摘要: 通过野外调查与室内模拟实验,采用综合评价指数法对丹江口水库新增淹没区农田土壤进行了潜在风险评估,结果表明:新增淹没区土壤背景总氮为 0.3~3.8g/kg,平均值 1.1g/kg;总磷为 0.2~2.4g/kg,平均值 0.8g/kg,入库支流区域土壤背景氮磷含量较高,新增淹没区的含量较低;土壤模拟淹水浸泡的溶出总氮为 0.2~11.8mg/L、总磷为 0.006~2.2mg/L,平均值分别为 4.1、0.3mg/L.空间分布上,土壤溶出氮磷与新增淹没区土壤氮磷背景值变化相似.新增淹没区潜在风险评估等级由低到高的面积分别占整个新增淹没区总面积的 3.3%、21.2%、56.9%、15.9%、2.7%,表明大部分新增淹没区处于中低风险等级,其中高风险区域主要集中在入库支流区域.

关键词: 丹江口水库; 土壤氮磷; 综合指数法; 潜在风险

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2015)01-0157-08

The potential risk evaluation of farmland soil from new submerged area in Danjiangkou Reservoir. WANG Jian¹, YIN Wei², ZHAO Xiao-lin¹, YANG Man¹, DUAN Chen¹, ZHU Dun¹, SHI Zhi-hua^{1*} (1.College of Resources and Environment, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China; 2.Changjiang Water Resources Protection Institute, Wuhan 430051, China). *China Environmental Science*, 2015,35(1): 157~164

Abstract: Comprehensive index was used to assess the potential risk of soils from submerged area in Danjiangkou reservoir through field investigation and indoor simulation experiments. The results showed that the background content of soil total nitrogen was 0.3~3.8g/kg, and its average was 1.1g/kg. The background content of soil total phosphorus was 0.2~2.4g/kg, and its average was 0.8g/kg. The contents of nitrogen and phosphorus were mainly concentrated in Danjiangkou reservoir tributaries, and the content of new submerged area was low. The content of soil dissolved total nitrogen was 0.2~11.8mg/L, and soil dissolved total phosphorus was 0.006~2.2mg/L. The average of soil dissolved total nitrogen; total phosphorus was 4.1, 0.3mg/L, respectively. The spatial distribution of soil dissolved nitrogen, phosphorus and the background values of soil nitrogen, phosphorus was similar. The proportion that the area of the risk assessment level from low to high accounted for the entire new submerged area was 3.3%, 21.2%, 56.9%, 15.9%, and 2.7%. Most of the new submerged area was low risk level, and high risk area was mainly concentrated in the tributary area of Danjiangkou Reservoir, which was required a focus in eco-environmental governance.

Key words: Danjiangkou Reservoir; soil total nitrogen and phosphorus; comprehensive index; potential risk

丹江口水库是南水北调中线工程水源地和我国最大的饮用水源保护区,保障水库水质安全是南水北调中线工程成功的关键^[1].丹江口大坝经过加高工程,蓄水位由原来的 157m 提高到 170m,新增淹没的农田面积近 26 万亩^[2].研究表明,农业面源污染已经成为丹江口水库的主要污染源^[3-5],水库新增淹没区农田养分物质释放的潜在风险不容忽视.目前,对丹江口水库新增淹没区的研究,主要集中在土壤养分^[6-7]、土壤重金属污染^[8]、有机污染物^[9-10]的分布状况以及风险评

价等方面,但是,对整个新增淹没区内农田土壤潜在风险评估鲜有报道.在土壤潜在风险评估方面,我国目前尚未建立完善、统一的评估方法和体系^[11],有学者对同类地区的三峡库区^[12]、太湖区域^[13]的土壤进行了风险评估,但对丹江口库区新增淹没区土壤潜在风险研究较少.

本文通过野外调查与室内模拟实验,采用综

收稿日期: 2014-04-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(41101250)

* 责任作者, 教授, pengshi@mail.hzau.edu.cn

合评价指数法对丹江口水库新增淹没区农田土壤进行了潜在风险评估,以期为后续的水生态保护和治理提供参考,同时为南水北调中线工程水质安全保障提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

丹江口水库是南水北调中线工程水源地,横跨豫鄂两省,汇水面积 9.5km²,界于东经 109°25'~111°52',北纬 32°14'~33°48'。土壤以山地黄棕壤和黄褐土为主,有紫色土发育。气候类型为北亚热带季风气候,年平均气温 15.8℃,年平均降水量 804.3mm,多集中在 7~9 月份,约占全年降水量的 49%^[14]。丹江口水库一期工程于 1973 年建成,正常蓄水位 157m,2014 年二期调水后,正常蓄水位达到 170m,抬高水位淹没影响区土地面积 307.7km² (图 1),涉及河南和湖北 2 省 6 个县(市)。丹江口库区人口密度大,土地负荷重,主要以农业生产为主,生态环境脆弱,受人类活动影响大,引起的环境效应显著。

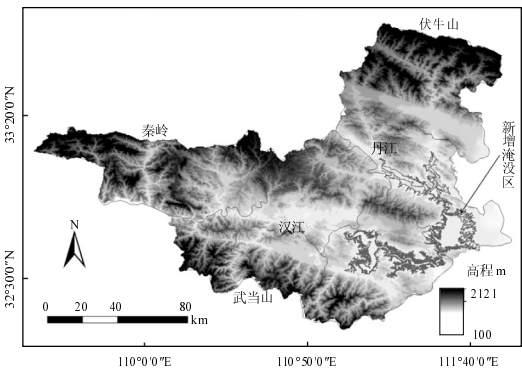


图 1 研究区域位置及新淹没区示意
Fig.1 Locations of the study and new submerged area in Danjiangkou reservoir

1.2 样品采集

根据均匀分布和典型代表性原则,综合考虑地形、土壤、土地利用等环境因素确定区域抽样调查单元,并结合典型样区,完成丹江口水库新增淹没区高程 170m 以下区域典型农田土壤调查,共采集 0~20cm 的土壤样品 164 个(图 2),将样品

带回实验室,用作模拟水库淹水浸泡实验和土壤化学性质分析。

1.3 实验设计

土壤化学性质分析:土壤全氮、全磷,pH 值、有机质、速效磷、铵态氮、硝态氮采用常规方法测定^[15]。

模拟水库淹水浸泡实验:考虑库区的环境结构、功能,将库区划分为若干环境单元,在每个环境单元内,分别安排一定数目的样点,力求模拟的土壤样品能反映整个新增淹没区农田土壤的生态环境状况和分布特征,共选取均匀分布于库区的 65 个土壤样品为实验对象,参考相关研究进行实验设计^[16-17],具体取过 10 目尼龙筛的土壤样品 500g,均匀铺于 12cm×12cm×40cm(长×宽×深)规格的玻璃缸底部,土层平均厚度约为 2~2.5cm,装填时采用干堆法,并按照下式计算填土深度:

$$W=V \cdot \rho (1+S) \tag{1}$$

式中:W 为装入土的质量(g);V 为装入土体体积(cm³);ρ 为天然土体干容重(g/cm³);S 为室内土壤含水量(%).

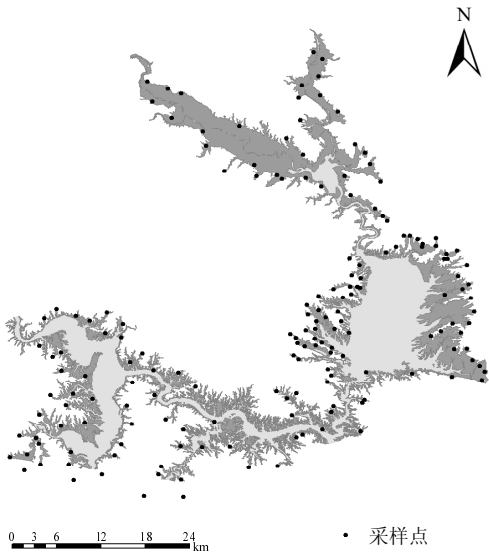


图 2 丹江口水库新增淹没区农田土壤采样点分布
Fig.2 Sample sites in farmland soil of new submerged area in Danjiangkou reservoir

装填土壤后,利用压实器将土壤压实,使其达到规定的土层深度,由此控制玻璃容器内土壤的

孔隙率与自然情况下基本相符.此后,在土层表面平铺一层 1cm 厚石英砂以防止加入去离子水过程中对土壤样品产生扰动,参考相关研究^[16-17],按照水土比 10:1 用虹吸管缓慢加入去离子水 5L,保持静态连续浸泡 20d.浸泡实验期间,每间隔 1d 进行水样采集,取样深度为 1/2 水深高度处,同时测定水样总氮和总磷.水样总氮和总磷分别采用碱性过硫酸钾消解-紫外分光光度法和 5%过硫酸钾消煮-钼锑抗分光光度法测定^[18].

模拟水库淹水实验中,选取库区代表性和典型样点,通过控制不同区域环境的土壤容重进行土壤装填,以控制模拟淹水土壤与实际土壤环境状况相符.此外,新增淹没区处于水陆交界的库岸带,当水库淹水后,由于水库水域面积巨大,水体对土壤并不会发生剧烈的扰动,而轻微的扰动影响较小,因此采用静态的方式进行模拟淹水实验,以此保证模拟实验的代表性和科学性.

1.4 数据处理

数据统计及分析采用 SPSS 软件,作图使用 Origin 软件.采样点分布、风险评估使用 ArcGIS 软件绘制.土壤背景全氮、全磷空间变异图和土壤溶出总氮、总磷空间变异图采用 ArcGIS 软件中反距离权值法(Inverse Distance Weighted)进行.该方法假设每个采样点间均有局部影响,并且这种影响与距离的大小成反比,因此该方法适用于变量影响随距离增大而减小的情况.由于水库新增淹没区采样点均匀分布于整个库区,在丹江口水库水域并无样点分布,因此采用反距离权重法进行空间插值,可以提高插值精度,减少由于水库水域的样点空缺带来的插值计算误差.

采用交叉检验法对反距离权重插值结果进行验证^[19],通过该方法计算预测值与实测值之间的均值误差(ME)和均方根误差(RMSE)及相关系数(CC)^[20].

1.5 风险评估方法

氮、磷释放受到地形、土壤、土地利用等多种因素影响^[21],对其风险评估既要保证操作的简便性及经济性,又要保证结果可靠准确,通

过多方面比较,选取氮磷综合指数方法对丹江口水库新增淹没区农田土壤氮磷释放风险进行综合评估.根据湖、库富营养化分级评级标准^[22]和地表水环境质量标准^[23],并结合实际情况,将水库新增淹没区农田土壤溶出氮浓度由低到高划分为 5 个等级:<1、1~2、2~5、5~8 和> 8mg/L;溶出磷由低到高划分为 5 个等级:<0.05,0.05~0.1,0.1~0.2, 0.2~0.5,>0.5mg/L,分别对 5 个等级赋予风险指数:0、1、2、3、4.综合氮释放风险指数和磷释放风险指数的计算结果,参考 Thomann 等^[24]提出的综合评价指数方法,将库区新增淹没区农田土壤氮、磷的风险指数平均为氮磷综合风险指数:

$$I_{\text{inter}}=I_{\text{P}}+I_{\text{N}} \tag{2}$$

其中: I_{inter} 为氮磷风险综合评价指数; I_{P} 和 I_{N} 分别为磷风险指数和氮风险指数.

根据根据氮磷综合风险指数的计算结果,利用 ArcGIS 软件的自然分割法进行氮、磷释放风险分级,以反映不同区域氮、磷释放风险的大小^[21].基于自然分割法,拟将新增淹没区土壤氮、磷释放风险指数划分为无风险、低风险、中风险、高风险和极高风险 5 个等级.各风险指数和风险的具体描述如表 1 所示.

表 1 风险评价等级与描述
Table 1 Levels and description of the assessment standards

风险等级	综合风险指数	说明
无风险	0~2.5	淹水后土壤释放的氮、磷对水体几乎没影响,水体没有富营养化的趋势,水质没有下降趋势
低风险	2.5~3.0	淹水后土壤释放的氮、磷对水体影响较小,水体具有轻度富营养化的趋势,水质具有微弱的下降趋势
中风险	3.0~3.5	淹水后土壤释放的氮、磷对水体影响中等,水体具有中度富营养化的趋势,水质下降程度较低
高风险	3.5~4.0	淹水后土壤释放的氮、磷对水体影响较大,水体具有重度富营养化的趋势,水质下降程度较为显著
极高风险	4.0~5.0	淹水后土壤释放的氮、磷对水体影响巨大,水体具有严重富营养化的趋势,水质下降程度非常明显

2 结果与讨论

2.1 土壤背景描述性统计

丹江口水库新增淹没区农田土壤背景统计特征如表 2 所示.土壤全氮为 0.3~3.8g/kg,平均值 1.1g/kg,全磷平均值 0.8g/kg.土壤 pH 值为 4.4~8.6,平均值为 7.2,属于中性酸碱度;土壤有机质为 7.7~48.3g/kg,平均值 19.8g/kg.土壤铵态氮、硝态氮、速效磷的变化范围较大,其平均值分别为 15.9,18.4,18.6mg/kg.根据第二次全国土壤普查土壤养分分级标准,新增淹没区农田土壤全氮、全磷、速效磷均属于 3 级,含量中等偏丰富,土壤有机质属于 4 级水平.

变异系数(CV)反映特性参数的空间变异程度,一般认为,CV< 0.1 表明该特征表现出弱变异性,CV 介于 0.1 到 1 之间则为中等变异,CV>1 为高度变异.从表 2 可知,总氮、总磷变异程度均为中等,总磷变异程度高于总氮.铵态氮、硝态氮、速效磷属于高度变异,变异程度最大的为铵态氮,pH 值的变异系数最低,数据表现出较好的稳定性和集中性.

表 2 新增淹没区农田土壤背景统计特征($n=164$)

Table 2 Statistical characteristics of soil nutrients of farmland soil from new submerged area ($n=164$)

指标	平均值	标准差	最小值	最大值	变异系数
全氮(g/kg)	1.1	0.4	0.3	3.8	0.4
全磷(g/kg)	0.8	0.4	0.2	2.4	0.5
pH 值	7.2	0.9	4.4	8.6	0.1
有机质(g/kg)	19.8	7.5	7.7	48.3	0.4
铵态氮(mg/kg)	15.9	20.1	0.4	104.0	1.3
硝态氮(mg/kg)	18.4	16.8	0.1	165.3	0.9
速效磷(mg/kg)	18.6	18.6	1.7	130.1	1.0

注: n 为样本数

在空间分布上(图 3),丹库新增淹没区(位于河南省境内)土壤全氮含量均匀,但总体偏低,汉库新增淹没区(位于湖北省境内)含量较高,入库

支流区域(水库西北边、西南边)的全氮含量高于丹库新增淹没区.土壤全磷含量较低,且空间分布不均,少数区域含量较高,主要分布在入库支流区域(水库西北边).丹库新增淹没区全磷含量较低,少数区域含量偏高,主要是由于各地区土壤立地条件和农业耕作措施的差异所造成的.整体上,入库支流区域土壤背景氮磷含量较高,丹库新增淹没区含量较低.

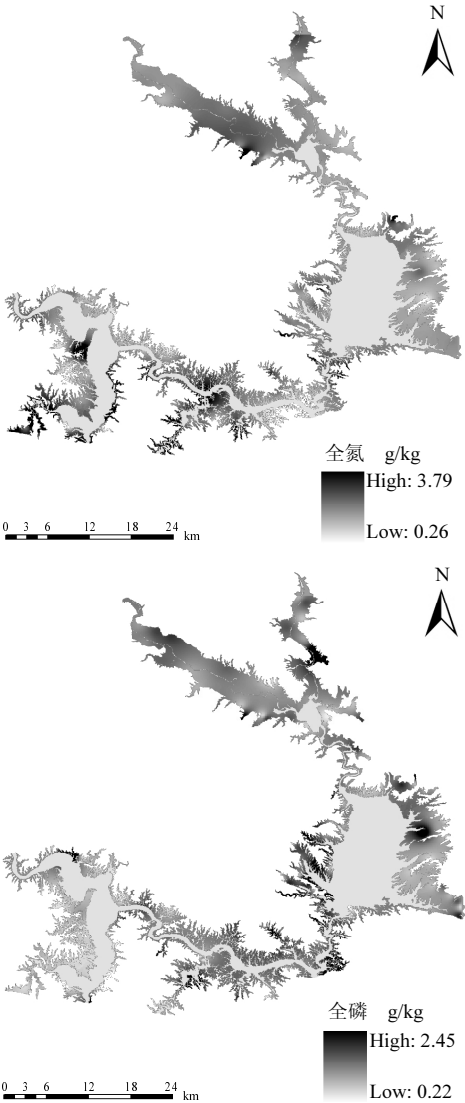


图 3 新增淹没区农田土壤全氮、全磷空间变异
Fig.3 Spatial distribution map of soil nitrogen and phosphorus of farmland soil from new submerged area

2.2 土壤潜在污染(TN、TP)溶出状况

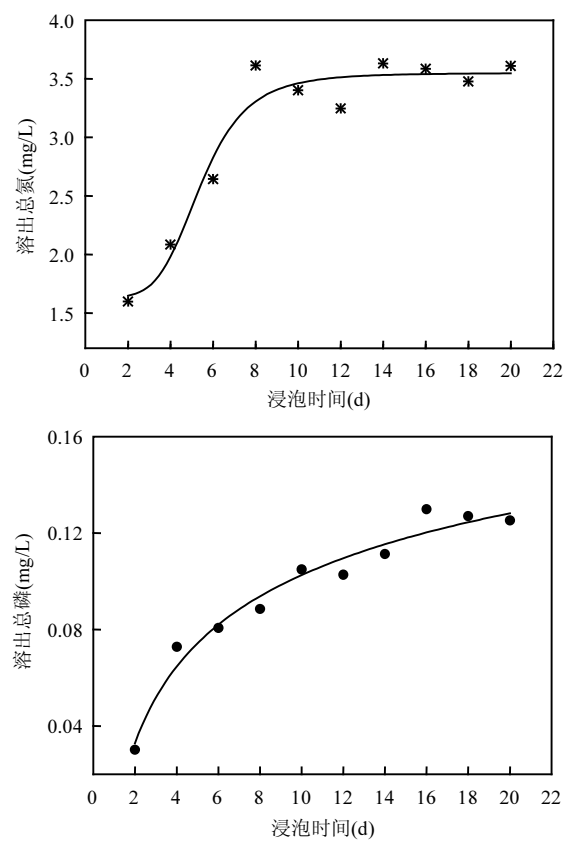


图 4 新增淹没区农田土壤 TN、TP 溶出特征
Fig.4 Characteristics of soil dissolved nitrogen and phosphorus of farmland soil from new submerged area

对新增淹没区农田土壤模拟水库淹水浸泡实验结果进行均值处理,得出整个库区农田土壤总氮(TN)和总磷(TP)浓度变化(图 4)。随着时间增加,溶出浓度逐渐增大,至 20d 左右达到平衡状态,最终平衡液中 TN 平均浓度达到 3.5mg/L,TP 平

均浓度为 0.1mg/L。一般认为,当水体中 TN 和 TP 浓度分别达到 0.2,0.02mg/L,从营养盐单因子考虑,已具备发生藻类生长的“水华”现象的可能^[25]。丹江口水库属于高氮低磷的水体背景条件,且 TP 浓度较低,但仍然具有较大的潜在风险。

TN 和 TP 浓度随时间变化规律不同,在淹水浸泡的第 14d 时,浸泡土样上覆水中的 TP 浓度达到平衡时的 90.23%,而 TN 浓度已经达到 99.43%,这主要是由于磷容易被土壤固定,不易溶出造成的。土壤溶出 TN 和 TP,随着时间表现出高度变异性,但是 TN 的变异性更高。

2.3 土壤氮磷溶出量估算

研究表明,一级对数方程能更好的解释土壤中氮、磷的溶出速率^[16],利用 SPSS 软件对新增淹没区的 65 个农田土壤氮磷溶出结果进行对数方程拟合并作相关性检验,结果表明,TP 和 TN 的溶出速率对一级动力学方程的相关性均较好,其估计参数如表 3 所示。

当土壤浸泡时间达到 20d 时,上覆水中的 TP、TN 浓度将达到平衡状态,将 $t=20$ 带入拟合方程中,得出土壤氮、磷最终平衡时上覆水中 TN、TP 平衡浓度,并利用平衡时 TP、TN 溶度与 pH、有机质、总氮、氨态氮、硝态氮、全磷和速效磷 7 个养分指标进行逐步回归分析,得出最优回归方程(表 4)。从回归分析结果可知,土壤总磷溶出量与速效磷、有机质呈极显著关系($P<0.01$),而总氮溶出量与铵态氮、pH 值呈极显著相关系($P<0.01$),回归方程及各个系数检验都达到极显著水平,用回归方程对 65 个样点进行总氮、总磷溶出量预测,得到预测值和实测值的拟合度分别为 0.84、0.82,说明方程适宜进行溶出总氮、总磷预测。

表 3 新增淹没区农田土壤 TN、TP 溶出量估算($n=65$)						
Table 3 Estimated of soil dissolved total nitrogen and phosphorus of farmland soil from new submerged area ($n=65$)						
项目	模型检验(显著性水平 $\alpha=0.05$)			参数		速率方程
	R^2	F	Sig.	b_0	b_1	
溶出总氮	0.86	50.53	0.00	1.70	0.91	$y = 0.91\ln(t) + 1.70$
溶出总磷	0.96	253.49	0.00	0.035	0.041	$y = 0.041\ln(t) + 0.035$

根据土壤溶出 TP、TN 的最优回归方程,计算出整个水库新增淹没区农田土壤的氮、磷溶出量,由表 5 可知,整个新增淹没区农田土壤溶出总氮为 0.2~11.8mg/L,平均值 4.1mg/L;溶出总磷为

0.006~2.2mg/L,平均值 0.3mg/L.土壤溶出氮变异系数为 2.3,属于高度变异;土壤溶出磷变异系数为 0.9,属于中等变异,溶出氮的变异程度高于溶出磷的变异程度.整体上,丹江口库区新增淹没区土壤溶出氮含量高于溶出磷含量,与之前的土壤背景氮、磷变化一致.土壤溶出磷的数据比较稳定,集中性较好,而土壤溶出氮数据波动性较大,离散度较高利用 ArcGIS 中反距离权重法,绘制出丹江口库区新增淹没区农田土壤溶出氮、磷连续均匀变化分布图(图 5).

表 4 新增淹没区农田土壤氮磷溶出量与影响因子逐步回归分析结果($n=65$)

Table 4 Stepwise multiple regressions between dissolved nitrogen and phosphorus from soils ($n=65$)

项目	入选变量	逐步回归方程	R^2	F	sig.
溶出总磷	速效磷(x_1)	$y=0.015x_1+0.016x_2-0.328$	0.78	46.86	0.000
	有机质(x_2)				
溶出总氮	铵态氮(x_3)	$y=0.15x_3+1.90x_4-11.57$	0.80	47.23	0.000
	pH 值(x_4)				

注:显著性水平 $\alpha=0.05$

表 5 新增淹没区农田土壤溶出氮、磷统计特征($n=164$)

Table 5 Statistical characteristics of soil dissolved nitrogen and phosphorus of farmland from new submerged area ($n=164$)

项目	平均值	标准差	最小值	最大值	变异系数
溶出总氮	4.1	1.7	0.2	11.8	2.3
溶出总磷	0.3	0.3	0.006	2.2	0.9

新增淹没区土壤溶出总氮空间变异强,在入库支流区域及人口居住密集、农业生产发达的地区,如凤凰镇、均县镇、武当山特区,溶出量较高,土壤溶出磷也表现出类似规律,与之前关于丹江口面源污染的研究结果一致^[3].氮、磷元素是水体富营养化的重要控制因子^[25-27],土壤氮、磷通过降雨径流、入渗、土壤侵蚀等过程释放到水体中,土壤淹水后向水体中释放氮、磷的能力与土壤背景氮、磷密切相关,整体上看,在土壤氮、磷环境背景较高的地方,其土壤溶出量也较高,丹江口库区新增淹没区溶出氮、磷较高的区域主要来自水库支流流域,这些流域内农业生产发达,水土流失

严重,是今后生态环境治理的重点区域.

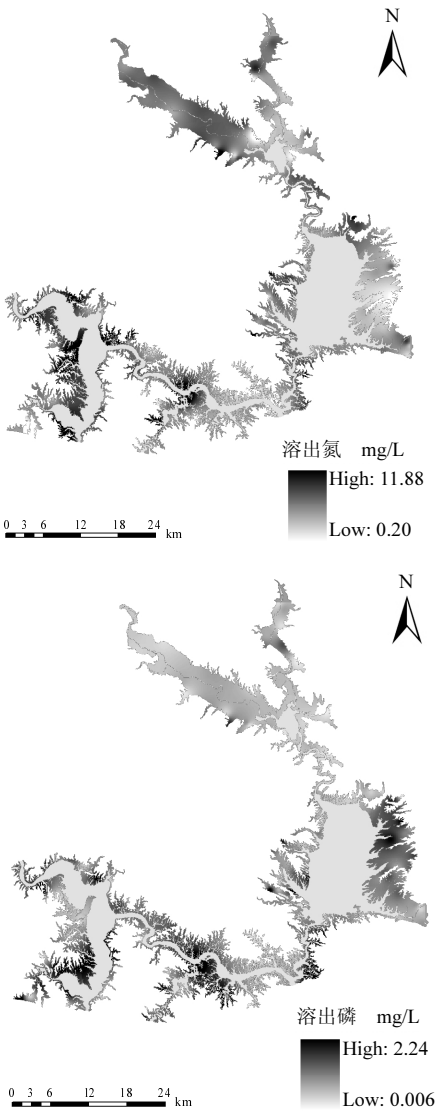


图 5 新增淹没区农田土壤溶出总氮、总磷空间变异
Fig.5 Spatial distribution of soil dissolved total nitrogen and phosphorus of farmland soil of new submerged area

2.4 插值结果验证

使用交叉检验法对反距离权重插值结果进行验证(表 6).4 个插值类别的均值误差较小,说明插值的系统误差不明显,除溶出总氮外,其余插值类别的均值误差均为负值,说明插值结果比实际值偏大.土壤全氮的估计值与实测值之间的均值误差最小,其值为-0.21,而溶出总氮的均值误差

最大,其值为 0.11,说明土壤全氮空间插值的系统误差最小,而溶出总氮空间插值的系统误差最大.均方根误差反映了空间插值误差的大小,土壤全氮的均方根误差最大,说明其空间插值的误差较大,而溶出总磷的空间插值误差最小.4 个插值类别的均方根误差较小,说明反距离权重插值的误差小,精度较高.4 个插值类别的相关系数均在 0.5 以上,表明估计值与观测符合程度较高,说明反距离权重插值的效果较好.

表 6 反距离权重插值的交叉验证结果

Table 6 Results of cross-validation for inverse distance weighting interpolation

插值类别	均值误差(ME)	均方根误差(RMSE)	相关系数(CC)
土壤全氮	-0.21	0.77	0.69
土壤全磷	-0.095	0.29	0.61
溶出总氮	0.11	0.51	0.68
溶出总磷	-0.026	0.11	0.58

2.5 潜在风险评估

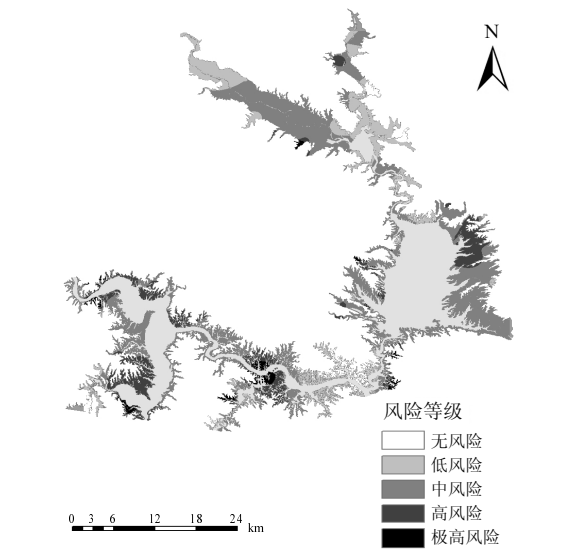


图 6 丹江口库区新增淹没区农田土壤潜在风险评估
Fig.6 Potential risk assessment map of farmland soil of new submerged area

丹江口库区新增淹没区土壤潜在风险评估结果如图 6,风险等级由低到高的面积为 15.9,

101.2,271.3,75.9,2.6km²,分别占整个新增淹没区总面积的 3.3%、21.2%、56.9%、15.9%、2.7%.其中大部分新增淹没区处于中低风险等级,中风险面积最大,无风险和高风险区域相当.高风险区域主要集中在库区的支流区域,主要是库区的西南边和西北边.河南境内的老城镇、双河镇、盛湾镇、凤凰镇属于高风险等级,这些区域地势比较平缓,适应农业生产,且生产力水平较高,肥料使用量大,污染风险相对较高;而湖北省境内的丹江口市、土台乡、土桥乡、均县镇处于高风险等级,这部分区域人口分布密集,该区域属于河流与水库交汇处,上游冲刷下来的悬浮颗粒夹带大量养分沉积在地势广阔的地段.

3 结论

3.1 丹江口库区新增淹没区土壤背景全氮为 0.3~3.8g/kg,平均值 1.1g/kg,总磷为 0.2~2.4g/kg,平均值 0.8g/kg.根据土壤养分含量分级标准,新增淹没区农田土壤全氮、全磷、速效磷均属于 3 级,含量中等偏丰富,土壤有机质属于 4 级水平.在空间变异上,入库支流区域土壤背景氮磷较高,丹库新增淹没区的含量较低.

3.2 新增淹没区土壤溶出总氮为 0.2~11.8mg/L,平均值 4.1mg/L;溶出总磷为 0.006~2.2mg/L,平均值 0.3mg/L.土壤总磷溶出量与速效磷、有机质呈显著关系($P<0.01$),而总氮溶出量与铵态氮、pH 值呈显著关系($P<0.01$);空间分布上,土壤溶出氮磷与新增淹没区土壤氮磷背景值变化相似.

3.3 库区风险评估等级由低到高的面积为 15.9, 101.2,271.3,75.9,12.6km²,分别占整个新增淹没区总面积的 3.3%,21.2%,56.9%,15.9%,2.7%.其中大部分新增淹没区处于中低风险等级,中风险等级面积最大;高风险区域主要集中在库区的支流区域.

参考文献:

[1] 李思悦,张全发.运用水质指数法评价南水北调中线水源地丹江口水库水质 [J]. 环境科学研究, 2008,21(3):61-68.
[2] 南水北调中线一期工程丹江口水利枢纽大坝加高工程初步设计阶段水库建设征地移民规划设计报告 [R]. 武汉:长江水利委员会长江勘测规划设计研究院, 2005.

- [3] 姜世英,韩 鹏,贾振邦,等.南水北调中线丹江口库区农业面源污染 PSR 评价与基于 GIS 的空间特征分析 [J]. 农业环境科学学报, 2010,29(11):2153-2162.
- [4] 方怒放,史志华,李 璐.基于输出系数模型的丹江口库区非点源污染时空模拟 [J]. 水生态学杂志, 2011,32(4):7-12.
- [5] 黄文敏,毕永红,胡征宇,等.丹江口水库农业面源污染特征研究 [J]. 环境科学与管理, 2012,37(1):33-38.
- [6] 肖春艳,武 俐,赵同谦,等.南水北调中线源头区蓄水前土壤氮磷分布特征 [J]. 中国环境科学, 2013,33(10):1814-1820.
- [7] Liu W, Liu G, Li S, et al. Phosphorus sorption and desorption characteristics of wetland soils from a subtropical reservoir [J]. *Marine and Freshwater Research*, 2010,61(5):507-512.
- [8] 张 雷,秦延文,郑丙辉,等.丹江口水库迁建区土壤重金属分布及污染评价 [J]. 环境科学, 2013,34(1):108-117.
- [9] 邵 超,张坤峰,周天健,等.南水北调中线源头淹没区土壤中多环芳烃的赋存分布特征 [J]. 环境科学学报, 2012,32(2):402-409.
- [10] 邵 超,张坤峰,周天健,等.丹江口水库库边降雨径流中有机氯农药赋存及风险评价 [J]. 中国环境科学, 2012,32(6):1046-1053.
- [11] 章海波,骆永明,李志博,等.土壤环境质量指导值与标准研究III:污染土壤的生态风险评估 [J]. 土壤学报, 2007,44(2):338-349.
- [12] 刘丽琼,魏世强,江 韬.三峡库区消落带土壤重金属分布特征及潜在风险评价 [J]. 中国环境科学, 2011,31(7):1204-1211.
- [13] 陈春霄,姜 霞,战玉柱,等.太湖表层沉积物中重金属形态分布及其潜在生态风险分析 [J]. 中国环境科学, 2011,31(11):1842-1848.
- [14] 刘占朝,王团荣,马喜明.河南省丹江口库区湿地自然保护区现状与管理对策 [J]. 水土保持通报, 2003,23(4):66-68.
- [15] 鲍士旦.土壤农化分析 [M]. 北京:中国农业出版社, 2003.
- [16] 袁 辉,王里奥,胡 刚,等.三峡库区消落带受淹土壤氮和磷释放的模拟实验 [J]. 环境科学研究, 2008,21(1):103-106.
- [17] 胡 刚,王里奥,袁 辉,等.三峡库区消落带下部区域土壤氮磷释放规律模拟实验研究 [J]. 长江流域资源与环境, 2008,17(5):780-784.
- [18] 国家环境保护总局.水和废水监测分析方法 [M]. 北京:中国环境科学出版社, 2002,247,255.
- [19] 李本纲,冯 楠,陶 澍.天津表土 DDT 浓度的空间插值方法研究 [J]. 农业环境科学学报, 2007,26(5):1624-1629.
- [20] 史文娇,岳天祥,石晓丽,等.土壤连续属性空间插值方法及其精度的研究进展 [J]. 自然资源学报, 2012,27(1):163-175.
- [21] 张 平,高阳昕,刘云慧,等.基于氮磷指数的小流域氮磷流失风险评价 [J]. 生态环境学报, 2011,20(6):1018-1025.
- [22] 王明翠,刘雪芹,张建辉.2002.湖泊富营养化评价方法及分级标准 [J]. 中国环境监测, 18(5):47-49.
- [23] GB3838-2002 地表水环境质量标准 [s].
- [24] Thomann R V, Mueller J A. Principle of surface water quality modeling and control [M]. New York: Haper and ROV, 1987.
- [25] Abrams M M, Jarrell W M. Soil phosphorus as a potential nonpoint source for elevated stream phosphorus levels [J]. *Journal of Environmental Quality*, 1995,24(1):132-138.
- [26] 赵章元,吴颖颖,郑洁明.我国湖泊富营养化发展趋势探讨 [J]. 环境科学研究, 1991,4(3):18-24.
- [27] Carpenter S R, Caraco N F, Correll D L, et al. Nonpoint pollution of surface waters with phosphorus and nitrogen [J]. *Ecological applications*, 1998,8(3):559-568.

作者简介: 王 剑(1990-),男,云南曲靖人,华中农业大学硕士研究生,主要从事环境生态、水资源管理研究。