

澜沧江水电开发对河岸带土壤养分分布的影响

魏国良, 李 帷, 汪 萍, 徐海峰, 谭承军, 商照荣

(环境保护部核与辐射安全中心, 北京 100082)

摘 要:以澜沧江中下游河岸带为案例研究区, 针对 4 种河段生态系统类型, 对比研究了水电开发对河岸带土壤养分空间分布的影响。结果表明: 水电开发是澜沧江中下游河岸带土壤养分空间分异的主要驱动力之一; 受水电开发的影响, 河岸带土壤主要养分因子含量和土壤养分综合质量均趋向规律性分布, 横向上随距离增加呈上升趋势, 纵向上在漫湾库区出现峰值; 漫湾库区和小湾样带土壤养分综合质量随距离变幅较小, 漫湾坝下和景洪样带土壤养分综合质量随距离变幅较大; 已建库区的植被恢复和小气候改善对库区及坝下河岸带土壤养分条件产生正面影响, 工程施工对在在建电站河岸带土壤养分条件产生负面影响, 且负面影响强度与施工规模和施工强度呈正相关关系; 随着与河道距离的增加, 水电开发的影响强度呈幂指数减小趋势; 总体来看, 养分条件较好的样点主要集中在已建库区和自然河段以及距离河道 50 m 以外的远岸处, 养分条件较差的样点主要集中在在建电站以及距离河岸 50 m 以内的近岸处。

关键词:水电开发; 土壤养分综合质量; 空间分布; 河岸带; 澜沧江

中图分类号: S153.6; X820.3

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2014)02-0047-06

Effects of Hydropower Development on Distribution of Soil Nutrients in Riparian along Lancang River

WEI Guo-liang, LI Wei, WANG Ping, XU Hai-feng, TAN Cheng-jun, SHANG Zhao-rong

(Nuclear and Radiation Safety Centre, Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China, Beijing 100082, China)

Abstract: Based on four types of river sections along the middle and lower reaches of Lancang River, the effects of hydropower development on spatial distribution characteristics of soil nutrients were studied. Results showed that hydropower development was one of the primary driving factors influencing spatial distribution characteristics of soil nutrients along the riparian of middle and lower reaches of Lancang River. Under the effects of hydropower development, spatial distribution of soil nutrient contents and soil quality index of riparian showed a rising tendency with the increasing distances to the riverbank, and the peak value appeared at Manwan reservoir riparian along the river. Soil quality indexes of Manwan reservoir and Xiaowan belts had lower changing coefficients, but they were higher in below-dam and Jinghong belts. The vegetation restoration and ameliorated climate conditions around the functioning reservoir had positive effects on soil quality of the riparian. However, the construction of dam had negative effects on soil quality and the dam construction with larger scale and heavier constructing intensity affected more seriously. At the same time, the transverse effect intensity of hydropower development reduced exponentially along with the increases in distances to riverbank. In general, under the effects of hydropower development, sampling plots with better soil quality concentrated in the riparian of reservoir and lower natural section and the range far away from riverbank and those with poorer soil quality concentrated in the riparian of constructing dams and the locations within 50 m to riverbank.

Key words: hydropower development; soil quality; spatial distribution; riparian; Lancang River

土壤养分是土地生产力的主要表征和生态系统物质生产的重要基础,是评价土壤质量和生态系统健康状况的重要指标^[1]。目前关于土壤养分的研究多集中在农业生产区和陆地森林^[2-3]。河岸带是河流流域与陆域进行物质、能量、信息交换的过渡带,具有多项重要的生态功能。当前国内外对河岸带生态系统的植被格局及生态过程进行了较多的研究^[4-5],但对土壤养分的关注较少,然而土壤养分是河岸带生态系统的重要环境因子,是河岸带生态系统可持续发展的重要支撑基础。

自然过程和人类活动是影响土壤质量演变的两大因素^[6-7]。河流水电开发是人类改造自然、寻求发展的重大活动之一,对自然生态系统尤其是河岸带生态系统的结构和功能产生了巨大的影响。水电开发通过调节洪水对河岸带沉积物的补充和冲刷强度间接改变了河岸带土壤养分的分布格局。水电开发历来备受关注,关于其生态环境效应的研究已有很多^[8-10],但水电工程建设对河岸带土壤养分空间分布的影响研究却并不多见。本文基于 2005 年末澜沧江水电开发的进展状态,以澜沧江中下游河岸带为案例研究区,通过比较分析在建水电站、已建水库及其坝下和下游河段的河岸带土壤养分因子和土壤养分综合质量的差异,计算土壤养分综合质量的变化幅度系数和水电开发的影响强度指数,分析探讨澜沧江中下游水电开发对河岸带土壤养分分布的影响特征,探索研究水电开发对河岸带土壤养分空间分布影响特征的一种思路和方法。

1 材料与方法

1.1 研究区域

澜沧江—湄公河为世界著名国际河流,发源于青藏高原,自北向南流经 6 个国家,是我国西南以及东南亚最重要的河流之一。澜沧江中下游地处滇西和滇西南河谷地带,主要属于亚热带山地季风气候,立体

气候特点显著,干湿季节分明^[11]。流域地表形态起伏大,破碎度高,具备深切中山、高原山地、山间盆地等复杂多样的地貌类型。植物分布属于北亚热带季雨林、半常绿季雨林地带中的滇西南河谷山地半常绿季雨林植被区^[12]。

澜沧江—湄公河干流长 4 880 km,其干流总落差 5 500 m 的 5 000 m(约 91%)集中在我国境内的澜沧江^[13],水能资源极为丰富。截至 2005 年已建成运行的有漫湾和大朝山两座水电站,小湾、糯扎渡和景洪水电站已开工建设(图 1,表 1)。

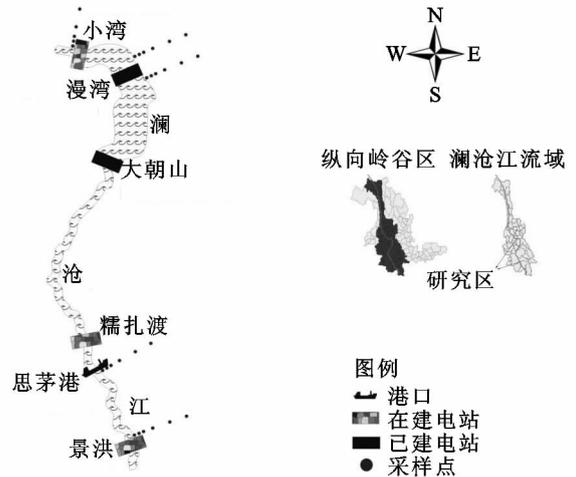


图 1 研究区及采样点示意图

1.2 采样与分析

2005 年 10—12 月在澜沧江中下游河岸带调查采样。依据在建电站、已建库区、坝下、下游自然河段 4 种不同河段类型进行样带布设,分别为小湾和景洪、漫湾库区、漫湾坝下、思茅港共 5 个样带,在每个样带以距离河道 10, 30, 50, 100, 200, 300 m 的距离梯度分别采样,样点分布和编号见图 1 及表 2。共采集表层土壤样品(多点混合样)30 个,采样的同时记录地势、海拔、坡度、空气温度和湿度等自然环境因子,采样点通过 GPS 定位。

表 1 2005 年澜沧江干流中下游水电站开发状态

| 电站 | 装机容量/万 kW | 正常水位/m | 总库容/亿 m ³ | 平均流量/(m ³ · s ⁻¹) | 流域面积/万 km ² | 2005 年状态 |
|-----|-----------|--------|----------------------|--|------------------------|----------|
| 小湾 | 420 | 1240 | 151.32 | 1210 | 11.33 | 在建 |
| 漫湾 | 150 | 994 | 10.06 | 1230 | 11.45 | 1996 年建成 |
| 大朝山 | 135 | 899 | 9.40 | 1330 | 12.10 | 2003 年建成 |
| 糯扎渡 | 550 | 812 | 237.03 | 1730 | 14.47 | 在建 |
| 景洪 | 150 | 602 | 11.39 | 1840 | 14.91 | 在建 |

土壤养分含量分析均采用国家标准方法,即 pH 采用电位法;有机质采用重铬酸钾容量法;全氮采用半微量凯氏蒸馏法;全磷采用钼锑抗比色法;速效磷采用盐酸氟化铵浸提钼蓝比色法;全钾采用原子吸收分光光度法;速效钾采用中性醋酸铵浸提—火焰光度法。

1.3 土壤养分条件评价方法

1.3.1 土壤养分因子 土壤养分包括碳、氮、磷、钾全量元素和某些微量元素,如硅、锌等,但与植物生长关系最大的主要是 C, N, P, K 这 4 种大量元素^[14-15]。本文根据研究区的土壤营养元素特征,兼顾养分指标

的重要性和调查数据的可得性,选择土壤有机质(OM)、全氮(TN)、全磷(TP)、全钾(TK)、速效磷(AP)、速效钾(AK)6项养分因子进行研究。研究区采样点编号详见表2。

表 2 研究区采样点编号

| 距离/m | 小湾 | 漫湾库区 | 漫湾坝下 | 思茅港 | 景洪 |
|------|-----|------|------|------|-----|
| 10 | XW1 | MWR1 | MWB1 | SMG1 | JH1 |
| 30 | XW2 | MWR2 | MWB2 | SMG2 | JH2 |
| 50 | XW3 | MWR3 | MWB3 | SMG3 | JH3 |
| 100 | XW4 | MWR4 | MWB4 | SMG4 | JH4 |
| 200 | XW5 | MWR5 | MWB5 | SMG5 | JH5 |
| 300 | XW6 | MWR6 | MWB6 | SMG6 | JH6 |

1.3.2 土壤养分综合质量 进行土壤养分综合质量指数的计算,可以比较各样带土壤养分综合情况的差异,并减小对土壤单一养分指标测评的片面性和不显著性^[16-17],有助于探讨水电开发对土壤养分条件的综合影响。本文采用多元分析方法和模糊数学原理确定土壤养分综合质量。

首先根据 C, N, P, K 四种元素的 S 型作物效应曲线计算得到各土壤养分指标的隶属度值。因 C, N, P, K 四种元素的作物效应曲线为 S 型,所以隶属度函数也采用 S 型,并根据模糊数学原理把曲线型函数转化为相应的折线型函数,以利于计算。根据全国第二次土壤普查的土壤养分含量分级结果,并结合研究区

表 3 土壤养分综合质量与影响因素之间的相关系数

| 项目 | 土壤养分综合质量 | 到河道距离 | 土壤 pH | 土壤含水量 | 海拔 | 坡度 | 气温 | 空气湿度 |
|----------|----------|--------|--------|----------|----------|--------|--------|------|
| 土壤养分综合质量 | 1 | | | | | | | |
| 到河道距离 | 0.462** | 1 | | | | | | |
| 土壤 pH | -0.596** | -0.073 | 1 | | | | | |
| 土壤含水量 | 0.050 | -0.056 | -0.031 | 1 | | | | |
| 海拔 | 0.229 | 0.193 | -0.262 | -0.371* | 1 | | | |
| 坡度 | -0.002 | -0.012 | 0.049 | -0.513** | 0.169 | 1 | | |
| 气温 | -0.150 | -0.129 | 0.410* | -0.027 | -0.551** | -0.212 | 1 | |
| 空气湿度 | -0.072 | 0.227 | 0.126 | 0.404* | -0.628** | -0.040 | -0.153 | 1 |

* $p < 0.05$, ** $p < 0.01$ 。

由表 3 可知,土壤养分综合质量与样点到河道距离呈显著正相关,与土壤 pH 值呈显著负相关,与其他影响因素相关性不显著。实验测定结果显示在建小湾和景洪电站河岸带土壤 pH 值普遍偏高,这是由于大坝建设破坏河岸带植被,造成表层土壤风化、淋溶导致大量有机酸和酸性腐殖质流失的缘故,已建漫湾库区土壤 pH 值较低除凋落物分解产生酸性有机质以外,还与水库蓄水提高库区空气湿度使土壤发生酸化有关。可见,土壤养分综合质量与土壤 pH 值的负相关关系也是水电开发影响的结果。以上分析充分表明水电开发是形成研究区土壤养分空间分布特

土壤养分实际状况,确定折线型函数曲线中转折点的相应取值。在此基础上,计算得到各养分指标的隶属度值。此值大小在 0.1~1.0 之间,最大值 1.0 表示土壤养分充足,完全满足植物生长的需要;最小值 0.1 表示土壤养分缺乏。然后采用 SPSS 13.0 统计软件中的因子分析法确定各养分指标的权重系数。

计算出各养分因子的隶属度值和确定相应权重以后,对各养分指标进行加权求和,得到反映土壤养分综合质量的评价值 SQI,其公式如下:

$$SQI = \sum_{i=1}^n S(x_i) \times W_i \quad (1)$$

式中:SQI——土壤养分综合质量指数; $S(x_i)$ ——各样点第 i 种养分指标的隶属度值; W_i ——各养分指标的权重系数; n ——参评养分指标数。

2 结果与分析

2.1 土壤养分空间分布与水电开发的相关关系

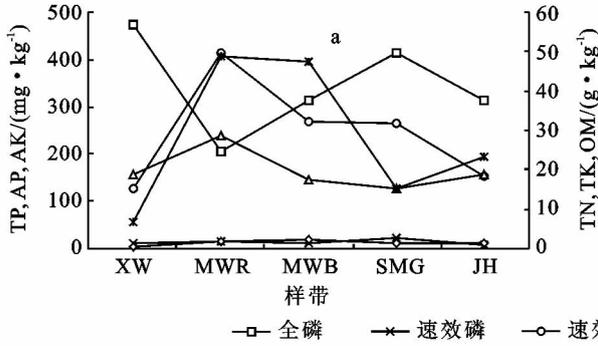
本研究所选择样带均位于天然林和抚育后的次生林当中,无近期的农牧活动影响,除自然因素以外,影响研究区土壤养分空间分布的人为因素主要是水电站的开发建设。以样点到河道的距离作为水电开发影响的体现指标,并全面考虑其他影响因素,对土壤养分综合质量与各影响因素进行相关分析(表 3)。

征的主要驱动力。

2.2 土壤养分因子空间分布

对实验室测得的土壤养分因子以样带和距离梯度进行平均处理发现各养分因子具有较明显的空间变异性(图 2)。纵向上基本呈现单峰曲线变化,除 TP 和速效磷外各营养元素含量最高值均出现在漫湾库区。野外调查资料表明漫湾库区河岸带多为以思茅松、红皮水锦和毛叶黄杞等高大乔木为优势种的原生和次生植物群落,是水电工程建成后自然或人工恢复后的生态系统。TP 最高值出现在小湾样带与大坝施工导致的土壤母质出露和工区生活排污有关。另外由图 2a 可以看出养分因子纵向变化多在思茅港处出

现异常波动,这是由于思茅港距离各水电工程最远,受影响最小,该样带土壤养分状况基本可以代表研究区的自然本底状态。横向上除 TK 变化较为平缓以外,其他养分含量表现出随距离增加逐渐增高的较高



一致性,反映了水电开发对近岸处土壤性状的影响程度大于远岸处的规律,另外除 TK 外各养分指标含量在 200 m 处均出现波动下降趋势,在一定程度上显示了水电工程影响范围的有限性。

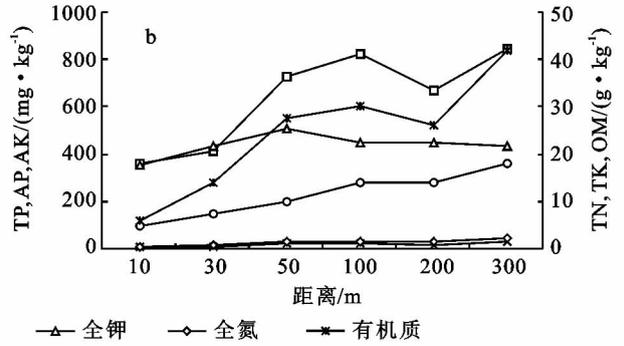


图 2 土壤养分因子空间分布特征

2.3 土壤养分综合质量横向空间变异

由图 3 可知,各样带土壤养分综合质量指数具有相似的横向变化趋势,即随着与河道距离的增加,综合指数值 SQI 呈波状上升趋势。经计算得到在不同距离梯度土壤养分综合质量指数的平均值大小排序为:300 m(0.617) > 100 m(0.573) > 200 m(0.559) > 50 m(0.457) > 30 m(0.389) > 10 m(0.289),其中 100 m 和 200 m 出现异位主要是由于思茅港样带距河道 100 m 处的土壤养分综合质量指数显著高于 200 m 处,另外图 3 显示思茅港样带横向变化波动最大,规律性不明显。就整个研究区的情况来看,5 个样带中思茅港距离各水电工程最远,受影响最小。若只考虑位于水电工程直接影响区的小湾、漫湾、漫湾坝下和景洪 4 个样带,则土壤养分综合质量具有随距离增加逐渐增高的较明显变化趋势。可以判断水电开发具有促使河岸带土壤养分趋向规律性分布的影响特征。

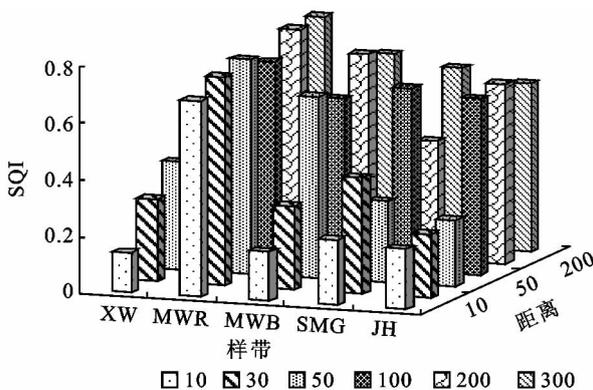


图 3 土壤养分综合质量空间分布

2.4 土壤养分综合质量纵向空间变异

由图 3 还可以看出,从澜沧江中游的小湾电站到下游的景洪电站,河岸带土壤养分综合质量在不同距离梯度的纵向变化趋势基本一致,均在漫湾库区出现

峰值。将各样带土壤养分综合质量指数进行平均,其具体排序为:漫湾库区(0.739) > 漫湾坝下(0.511) > 思茅港(0.435) > 景洪(0.418) > 小湾(0.300)。

据调查,小湾和景洪电站目前正处于施工阶段,开挖山体、植被清除、水土流失等极大地破坏了河岸带土壤的理化结构和性质,导致土壤养分状况变差。同在建设施工中的小湾样带土壤养分综合质量指数平均值低于景洪样带与小湾电站施工规模较大,河岸带土壤受扰动较大有关。相反,漫湾电站已正常运行十多年,库区植被已得到了很好的恢复,植被结构复杂,枝叶繁茂,根系发达,丰富的枯枝落叶增加了土壤养分含量。同时水库蓄水改善了库区小气候,湿度增加,昼夜温差变小,抑制土壤有机质的矿化过程,有利于土壤养分的积累。可见不同样带土壤养分综合质量的差异与水电开发的不同进程阶段有很大关系。

2.5 土壤养分综合质量变化幅度分析

不同样带土壤养分综合质量随距离的变化幅度有所不同。为了表现这种变化差异,这里引入了变幅系数的概念,变幅系数表达了样带土壤养分状况随距离的变化幅度和速率,是土壤养分综合质量指数与距离的函数,其关系式如下:

$$VE_i = \frac{SQI_{ij}}{d_{ij}} + \delta \quad (2)$$

式中: VE_i ——土壤养分综合质量随距离的变幅系数; SQI_{ij} ——样点土壤养分综合质量指数; d_{ij} ——样点到河道的距离; δ ——常数项。

对各样带土壤养分综合质量指数随距离的变化进行回归分析,由图 4 可知,漫湾库区和小湾变幅系数较小,表明土壤养分综合质量随距离的变化比较平缓,景洪和漫湾坝下变幅系数较大,表明土壤养分综合质量随距离的变化幅度较大。

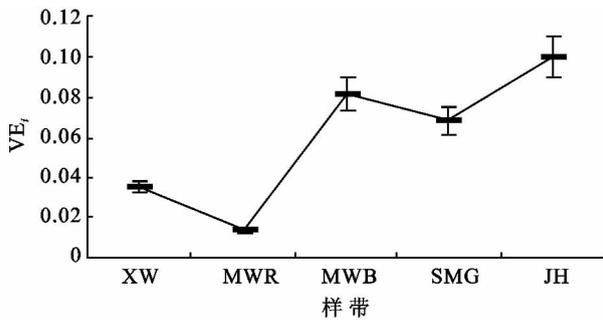
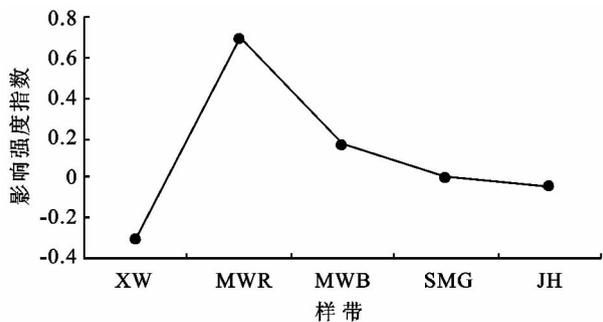


图 4 各样带土壤养分综合质量变幅系数比较

土壤养分综合质量变幅系数与样带所处位置以及受水电开发的影响范围具有较高的相关性,现场调查结果也充分证明了这一点。据调查,小湾大坝施工影响范围较大,该样带从河边 10 m 到 300 m 的范围内,生态系统状况均较差且一致性较高,而漫湾库区为结构完整的高覆盖度森林生态系统,地表、植被和土壤状况也都较为一致,因此两样带土壤养分综合质量随距离的变化幅度较小。景洪电站施工强度较小,大坝工程建设对河流两岸的影响范围有限。由土壤养分综合质量指数计算结果可知景洪样带从 50 m 到 100 m 样点处 SQI 值突然陡增,而 50 m 以内和 100 m 以外则变化极为平缓,变异系数分别仅为 4.4% 和 3.3%,可见在 50 m 和 100 m 之间存在一个突变点,从而导致整个样带土壤养分综合质量指数出现较高的变幅系数,同时也表明调查时景洪水电站建设的影响范围在距离河岸 100 m 之内,受影响区域与未受影响区域土壤养分状况显著不同。漫湾坝下样带变幅



系数较大与水库蓄水排水造成坝下河段水文情势变化较大有关。调查发现,漫湾坝下 50 m 以内的河岸带由于经常受到河水的强烈冲刷,植被稀疏,土壤较薄,而 50 m 以外区域的生态系统状况与漫湾库区极为相似,两者连为一体,生态环境的显著不同导致了坝下近岸处和远岸处土壤养分条件的极大差异。

2.6 水电开发影响强度分析

影响强度是指水电开发对河岸带土壤养分含量的影响程度大小。上述分析已表明研究区土壤养分空间分布特征主要受水电开发过程中大坝建设和水库运行的影响,在此基础上,通过影响强度指数的计算,可以比较水电开发不同阶段对河岸带土壤养分条件的影 响大小。思茅港样带位于已建漫湾电站下游 341 km 和在建糯扎渡电站下游 30 km 处,为下游河段类型,在 5 个样带中距离各水电工程最远,最接近研究区生态系统的自然状态,因此以思茅港样带作为参照样带,对研究区水电开发在纵向和横向上的影响强度进行分析。影响强度计算公式为:

$$\begin{cases} EI_i = SQI_i / SQI_s - 1 & \text{纵向梯度} \\ EI_j = (1 - SQI_j) / SQI_s & \text{横向梯度} \end{cases} \quad (3)$$

式中: EI_i , EI_j ——水电开发在纵向不同样带和横向不同距离梯度的影响强度指数; SQI_i , SQI_j ——各样带和各距离梯度上土壤养分综合质量的平均值; SQI_s ——思茅港样带土壤养分综合质量平均值。

由公式(1)和公式(3)计算得到研究区水电开发对河岸带土壤养分综合质量的影响强度指数见图 5。

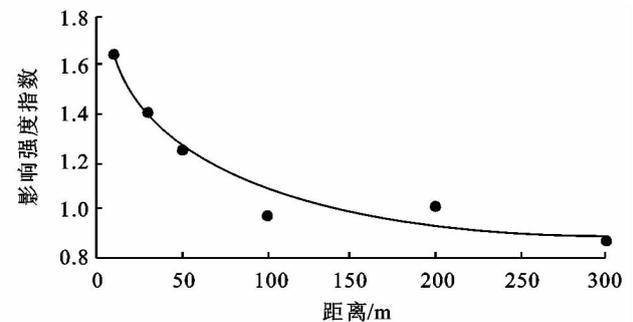


图 5 影响强度纵向和横向变化比较

由图 5 可知,纵向上,漫湾电站建成后植被的恢复与保育以及库区小气候的改善对漫湾库区及其坝下河段河岸带土壤养分条件产生了正面影响,其中对库区的影响强度较大。在建电站的工程建设对河岸带土壤养分条件产生负面影响,由于施工规模的较大差异,小湾河岸带土壤养分条件受到的负面影响强度明显大于景洪河岸带。横向上,随着与河道距离的增加,水电开发对河岸带土壤养分条件的影响强度呈幂指数下降态势,关系式为 $y = 2.516x^{-0.183}$ 。分析图 5 可知在 100 m 以内影响强度指数变化较快,遵循 20%

左右的递减率,而在 100 m 以外影响强度指数变化比较平缓,甚至在 100 m 和 200 m 之间出现小幅反复,表明水电开发的影响在距离河岸 200 m 处已经很小。分析表明水电开发影响强度指数与到河道的距离呈极显著负相关关系,相关系数为 0.97 ($p < 0.01$)。

2.7 土壤养分综合质量分级

将研究区 30 个样点的土壤养分综合质量计算结果进行等级划分,共划分为 4 个质量等级(表 4),并结合野外调查资料,可以明显反映出土壤养分条件与生态环境之间的相关关系。

表 4 土壤养分综合质量分级及样点生态环境状况

| 级别 | 质量范围 | 样点分布 | 植被特征 | 土壤性状 | 海拔/m | 坡度/(°) |
|----|-----------|---|---------------------|---------------------|----------|--------|
| 一级 | ≥0.70 | MWR2, MWR3, MWR4, MWR5, MWR6, MWB5 | 天然阔叶林、针叶林, 覆盖度高 | 壤质, 黄褐色, 腐殖质层厚 | 980~1125 | 18~30 |
| 二级 | 0.50~0.70 | MWR1, MWB3, MWB4, MWB6, SMG4, SMG6, JH4, JH5, JH6 | 天然林、人工林及灌木混生, 覆盖度较高 | 壤质+砂壤质, 黄褐色, 腐殖质层较厚 | 550~1130 | 35~40 |
| 三级 | 0.25~0.50 | XW2, XW3, XW4, XW5, XW6, MWB2, SMG2, SMG3, SMG5 | 灌木为主, 覆盖度较低 | 砂壤质, 黄褐+黄色, 腐殖质层薄 | 590~1250 | 15~30 |
| 四级 | ≤0.25 | XW1, MWB1, SMG1, JH1, JH2, JH3 | 草本为主, 覆盖度低 | 黄壤+沙土, 黄褐色, 腐殖质层极薄 | 540~1040 | 5~30 |

由表 4 可知, 一、二级土壤养分综合质量样点横向上主要分布于距离河道 50 m 以外的范围, 纵向上主要分布于已建库区和下游自然河段, 相应生态环境状况较好。三、四级土壤养分综合质量样点横向上主要分布于距离河岸 50 m 以内的近岸处, 纵向上主要分布于在建电站, 相应生态环境状况较差。

3 结论

水电开发将河流连续体分割为在建电站、已建库区、坝下和下游自然河段 4 种不同的河段生态系统类型, 从而导致河流生态系统结构和功能特征的地域差异性, 其中土壤养分条件是重要的表征要素。相关分析表明澜沧江干流水电开发是产生澜沧江中下游河岸带土壤养分条件空间分异的主要驱动因素。在水电开发的影响下, 河岸带土壤主要养分因子含量和土壤养分综合质量均呈现规律性空间分布特征, 横向上随着与河道距离增加呈波状上升态势, 纵向上在漫湾库区出现峰值。不同样带土壤养分条件横向分布特征的差异与样带所处位置以及受水电开发影响范围大小不同有较大关系, 植被恢复较好的漫湾库区和施工影响范围较小的小湾电站河岸带土壤养分条件随距离变幅较小, 水情变化较大的漫湾坝下河段和施工影响范围较小的景洪电站河岸带土壤养分条件随距离变幅较大。已建电站和在建电站对河岸带土壤养分条件的影响特征显著不同, 已建库区的植被恢复和小气候改善产生正面影响, 在建电站的工程施工产生负面影响, 且负面影响强度与施工规模呈正相关关系; 随着与河道距离的增加, 水电开发的影响强度逐渐减弱。河岸带土壤养分条件的分级表明养分条件较好的样点主要分布于已建库区和下游自然河段以及距离河道 50 m 以外的远岸处, 养分条件较差的样点主要分布于在建电站以及距离河岸 50 m 以内的近岸处。

参考文献:

- [1] Andrews S S, Karlen D L, Cambardella C A. The soil management assessment framework: a quantitative soil quality evaluation method [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2004, 68(6): 1945-1962.
- [2] 卢建利, 陈云明, 张亚莉, 等. 黄土丘陵半干旱区沙棘生长对土壤水分及养分影响[J]. *水土保持研究*, 2008, 15(3): 137-145.
- [3] 吕宁, 吕新, 马莉, 等. 基于 GIS 的滴灌棉田土壤养分空间变异及预测方法比较研究[J]. *土壤通报*, 2013, 44(2): 403-408.
- [4] Lytle D A, Poff N L. Adaptation to natural flow regimes[J]. *Trends in Ecology and Evolution*, 2004, 19(2): 94-100.
- [5] 陈子珊, 高甲荣, 包昱峰, 等. 河溪利用方式对河岸带木本植物多样性的影响[J]. *水土保持研究*, 2008, 15(4): 189-191.
- [6] Doran J W. Soil health and global sustainability: translating science into practice[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2002, 88(2): 119-127.
- [7] 陈松, 桂和荣, 孙林华. 安徽宿州地区石灰岩—土壤元素迁移及质量评价[J]. *环境化学*, 2013, 32(6): 987-992.
- [8] 韦洪莲, 倪晋仁, 王裕东. 三门峡水库运行模式对黄河下游水环境的影响[J]. *水利学报*, 2004(9): 9-17.
- [9] Mumba M, Thompson J R. Hydrological and ecological impacts of dams on the Kafue Flats floodplain system, southern Zambia [J]. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2005, 30(6): 442-447.
- [10] 陈云华. 雅砻江锦屏大河湾水生生态环境保护研究[J]. *水力发电*, 2012, 38(10): 5-8.
- [11] 何云玲, 张一平. 澜沧江干流河谷盆地气候特征及变化趋势[J]. *山地学报*, 2004, 22(5): 539-548.
- [12] 何大明, 吴绍洪, 彭华, 等. 纵向岭谷区生态系统变化及西南跨境生态安全研究[J]. *地球科学进展*, 2005, 20(3): 338-344.
- [13] 陈丽晖, 何大明. 澜沧江—湄公河水梯级开发的生态影响[J]. *地理学报*, 2000, 55(5): 577-586.
- [14] 沈德福, 史学正, 吕成文, 等. 江苏沿江地区土壤肥力空间分布及其区域对比研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2005, 14(3): 316-321.
- [15] 王长庭, 王根绪, 刘伟, 等. 高寒草甸不同类型草地土壤机械组成及肥力比较[J]. *干旱区资源与环境*, 2013, 27(9): 160-165.
- [16] 周勇, 张海涛, 汪善勤, 等. 江汉平原后湖地区土壤肥力综合评价方法及其应用[J]. *水土保持学报*, 2001, 15(4): 70-74.
- [17] 刘世梁, 傅伯杰, 吕一河. 坡面土地利用方式与景观位置对土壤质量的影响[J]. *生态学报*, 2003, 23(3): 414-420.