

余慧娟, 许士国, 朱 林. 水库沉积物资源化利用基础研究——以碧流河水库大堡库区为例[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(9): 1977-1985.
YU Hui-juan, XU Shi-guo, ZHU Lin. Fundamental study on the utilization of sediment in reservoir: A case study of Dapu area in the Biliuhe reservoir[J].
Journal of Agro-Environment Science, 2018, 37(9): 1977-1985.

水库沉积物资源化利用基础研究 ——以碧流河水库大堡库区为例

余慧娟, 许士国*, 朱 林

(大连理工大学水利工程学院, 大连 116024)

摘 要:为解决水库清淤后沉积物的处理问题,以碧流河水库为研究对象,通过分层沉积物样品采集及分析,从沉积物酸碱性和壤质类型适宜度、养分丰富度、重金属污染程度以及毒性评价等方面分析研究水库沉积物土地利用可行性。结果表明:碧流河水库大堡库区各层沉积物样品中66.7%以上pH值介于6.0~7.5之间,76.2%以上样品为壤土;各层沉积物有机质平均含量在27.13~35.77 g·kg⁻¹之间,其中81.0%以上有机质含量高于流域种植土壤有机质含量最小值;各层重金属平均含量除Cd超标外,Cu、Pb和Zn含量均在限值以内,重金属评价结果显示整体重金属污染水平为严重。研究表明大堡沉积物可安全用于场馆、绿化、商业、公共市政用地等Ⅱ类土地利用类型,也可用于Ⅰ类直接暴露于人体的土壤,但在使用前需进行预处理。

关键词:碧流河水库;水库淤积;沉积物;土地利用

中图分类号:X524 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2018)09-1977-09 doi:10.11654/jaes.2017-1654

Fundamental study on the utilization of sediment in reservoir: A case study of Dapu area in the Biliuhe reservoir

YU Hui-juan, XU Shi-guo*, ZHU Lin

(School of Hydraulic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: To solve the problems associated with dredging sediments, in the present study, fundamental analyses were conducted for sediments collected from the Biliuhe reservoir. The feasibility of land use of reservoir sediments was analyzed with respect to sediment acidity, soil type, nutrient richness and spatial distribution, and current state and toxicity of heavy metals. Over 66.7% of the samples in each sediment layer were in the pH range 6.0~7.5, and over 76.2% of the samples were loam. The average organic matter content in each sediment layer ranged from 27.13 to 35.77 g·kg⁻¹, and the content of over 81.0% of the samples was higher than the minimum levels for this basin. Analysis of the spatial distributions of nutrients in each sediment layer revealed that samples with higher organic matter content were mainly distributed near the river channel and the national highway, while those with lower organic matter content were located further from the right bank of the Biliuhe channel. With respect to heavy metals, the average content of copper, lead, and zinc was within the limit of the national standards, although that of cadmium was not. The results of the heavy metal evaluation revealed low levels of Fe, Mn, Cu, Pb and Zn pollution, and high levels of Cd pollution, amounting to an overall high level of heavy metal pollution. The results indicate that sediments in the Dapu area can be safely used for venues, greening, commercial land, public municipal land, and other class II lands. It can be used for class I land, which is directly exposed to humans, but pretreatment should be conducted to ensure safety.

Keywords: Biliuhe reservoir; siltation; sediment; land use

收稿日期:2017-12-01 录用日期:2018-03-06

作者简介:余慧娟(1992—),女,河南驻马店人,博士研究生,主要从事水库水环境保护与修复研究。E-mail:yuhuijuan@dlut.edu.cn

*通信作者:许士国 E-mail:sgxu@dlut.edu.cn

基金项目:国家自然科学基金重大研究计划项目(2016YFC0400903);国家自然科学基金专项基金项目(51327004)

Project supported: The Major Research Plan of the National Natural Science Foundation of China(2016YFC0400903); The Special Funds of the National Natural Science Foundation of China(51327004)

我国大坝建设高峰期主要集中于1958—1966年和1981—1997年两个时期^[1]。前期由于缺乏水库运行管理经验致使水库淤积严重,据统计,截止到1981年底全国水库总淤积量达 $115 \times 10^8 \text{ m}^3$,占统计水库总库容的14.2%,水库年平均淤积率达2.3%,高于世界各国^[2]。对此我国学者经过30余年的努力,在淤积实测资料^[3-4],泥沙处理技术^[5],防淤、减淤措施^[6],泥沙运行规律^[7]等方面均取得一定成果,使得入库泥沙减少很多。然而汛期大量有机体入库是现今水库面临的普遍性问题,使得水库淤积物由泥沙为主转变为泥沙与有机质共存的局面^[8],并存在引发水质危机潜能^[9]。东北地区水土流失严重,雨水主要集中于汛期,且多暴雨,水库易于淤积,由于全年雨水量少,水库常年缺水,底部少有放水情况,使得水库沉积物一直处于蓄积状态^[10];加之过去的二三十年我国处于经济发展高峰期,工农业、畜牧养殖业、居民生活等产生的废弃物、污染物增多,且随径流直接或间接流入水库,短期内难以被完全降解的物质逐渐蓄积于库底^[11],日积月累的蓄积量使得沉积物“源”角色逐渐凸显,污染物再次威胁上覆水体,沉积物成为内源污染^[12]。目前距大坝第二建设高峰期已有20余年,水库面临程度不一的内源污染和淤积问题。枯水期清淤是解决水库内源污染与淤积的有效措施,但沉积物处理不当会引起二次污染并造成资源浪费。

目前疏浚淤泥的处理已从堆放、吹填、海洋抛弃和焚烧等传统处理方式,逐渐发展为土地利用、建筑材料、填方材料、污水处理材料以及能源回收等资源化处理方式^[13]。传统处理方式存在对环境再污染问题,资源化利用将是未来发展的趋势,但部分资源化方式如污水处理材料、能源回收等具有用量少、对处理对象选择性高等问题,无法满足大批量淤泥处理问题。土地利用、建筑材料等更适应我国现状。目前该方面研究主要集中于河流湖泊,对水库沉积物资源化利用研究较少。本文以典型东北水库碧流河水库为研究对象,结合水库淤积特点,基于水库淤积现状,对水库进行沉积物样品采集及分析,研究水库淤积物土地利用可行性,填补碧流河水库沉积物资源化利用空白,并为后续水库清淤、沉积物资源化利用等工作提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

碧流河水库位于辽宁省普兰店市、庄河市和盖州

市的交界处,有碧流河、蛤蜊河和八家河三个入库河流,305国道南北贯穿库区,水质总体在Ⅱ类左右。该水库目前已运行30余年,在水库运行过程中,由于入库水多为大流量的洪水输入,而放水过程多以满足供水需要的小流量均匀地从上层取出^[10],使得水库沉积物一直处于蓄积状态。汛期库区淹没范围较大,入库口处水流由急变缓,水体承载运输泥沙能力降低,使得入库口易于淤积。本文对碧流河水库三个主要入库口——大堡、桂云花和钟岭分别进行淤积现场调查,发现这些区域部分点位沉积物均存在明显分层现象。不同典型年份入库流量不同,流水所携带黏土、泥沙、动植物残骸等比例也不相同,从而形成了沉积物分层现象,反映出碧流河水库的淤积状况。大堡库区位于水库干流——碧流河入库口处,相对于两个支流入库口——桂云花和钟岭库区,在非汛期裸露面积较大,且部分区域常被附近居民私自耕种占用,大堡被占用种植区范围见图1。农田土质疏松易流失特性使得大堡库区更易淤积,也赋予了该区沉积物农用地再利用率,因此本文选择大堡库区为研究对象。

1.2 样品采集

本文采用均匀布点法进行采样,采样点分布如图1所示,河道右岸代表采样点为1~5号,主洪区代表采样点6~11号,河道左岸代表采样点12~21号,其中12、13、14、16、17采样点位于种植区范围。样品采集于库区裸露期,用铁锹挖出剖面,不锈钢铲子去除与铁锹接触层的垂直表面,再分层截取样品。采样深度为60 cm,0~20 cm沉积物每2 cm取一次样,20~50 cm沉积物每5 cm取一次样,50~60 cm沉积物每10 cm取一次样。分别选取4~6、14~16、25~30、50~60 cm样品对不同深度沉积物进行代表性分析研究。

1.3 实验分析方法

将现场采集样品经常温自然风干后,用研钵进行粗研磨,过10目筛(2 mm)去除石子和动植物残屑等异物,分别取过10目筛后的适量样品用于pH、粒径和有机质测定;再将第一步研磨后的沉积物样品(<2 mm)进行第二次细研磨,过200目筛(0.075 mm),取适量小于0.075 mm的沉积物样品进行重金属检测。pH测定采用德国WTW公司Multi 3430水质分析仪,检测沉积物和水(体积比1:5)的悬浊液完成^[14];粒径分析选用英国马尔文仪器公司Mastersizer 2000激光粒度仪^[15]完成;有机质分析选用操作简易、方便,测定的烧失量和有机质含量比较接近且结果较为稳定的550 °C烧失法^[16-18];重金属的检测指标包括Fe、Mn、

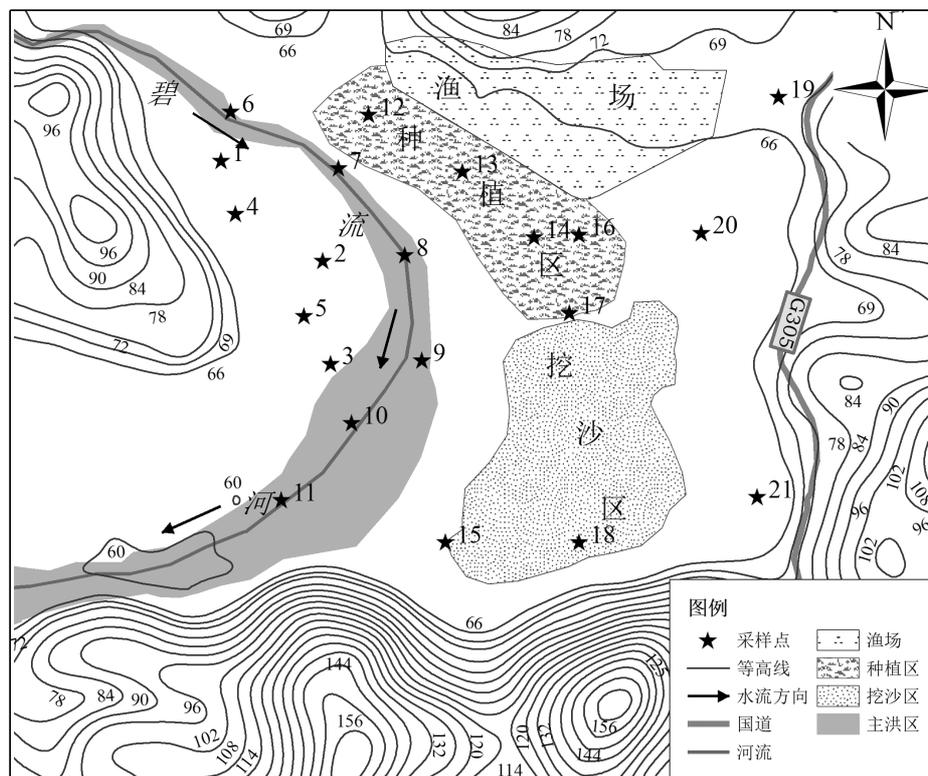


图1 碧流河水库大堡库区采样点分布图

Figure 1 The distribution of sampling sites in Dapu area of the Biliuhe reservoir

Cu、Cd、Pb和Zn,具体检测步骤为:取0.500 0 g沉积物利用硝酸、氢氟酸和高氯酸(5:5:3,体积比),在200℃电热板上消解至近干,1%稀硝酸转移定容后于4℃贮存待测,用火焰原子吸收分光光度计(普析,TAS-990)检测;每组消解样品包含不少于10%的平行样,以及2个以上的标准物质(GSD-7a),平行样的相对平均偏差小于5%,标准物质的回收率分别为92.77%(Fe)、94.20%(Mn)、120.50%(Cu)、118.07%(Cd)、80.08%(Pb)和94.88%(Zn)。

1.4 重金属评价方法

潜在生态危害指数法引入毒理学,能同时反映重金属的单因素污染和综合污染状况,用来评价大堡沉积物土地利用的风险性,具有指导性意义。表达式见式(1)和式(2)。

$$E_i^i = T_i^i \cdot C_j^i = T_i^i \cdot \frac{C_{\text{实测}}^i}{C_n^i} \quad (1)$$

$$RI = \sum E_i^i \quad (2)$$

式中: E_i^i 、 RI 分别指单项、综合潜在生态风险指数; T_i^i 为采样点某一重金属的毒性响应系数,本文各重金属元素的毒性系数选择如下:Mn=Zn=1,Cu=Pb=5,Fe=6,Cd=30^[19-20]; C_j^i 为该重金属污染系数; $C_{\text{实测}}^i$ 为该重金属的实测含量; C_n^i 为重金属的评价标准。

重金属单项和综合潜在生态风险指数(E_i^i 和 RI)的分级标准参考方法原文^[21],并结合本文评价对象种类及数量修订如表1所示。各金属评价标准参考大连市土壤背景值,即Fe、Mn、Cu、Cd、Pb和Zn的 C_n^i 值分别为27 100、620、21、0.075、19.6、55.9 mg·kg⁻¹。

表1 单项及综合潜在生态评价指数与其分级标准

Table 1 The single and comprehensive potential ecological risk indices and their criteria

E_i^i	单项潜在生态风险等级(等级代码)	RI	综合潜在生态风险等级(等级代码)
<40	低(I)	<50	低(I)
40~80	中等(II)	50~100	中等(II)
80~160	较重(III)	100~200	重(III)
160~320	重(IV)	≥200	严重(IV)
≥320	严重(V)		

2 结果与讨论

2.1 壤质适宜性

土壤pH值综合反映土壤的化学性质,对土壤的生态环境有深刻的影响,对于大多数植物,最适宜的土壤pH范围为弱酸性到中性(6.0~7.5)^[22]。分析碧流河水库大堡库区各层沉积物pH值可知,大堡沉积物

pH 值主要以酸性 (<6.0)、弱酸性 (6.0~6.5) 和中性 (6.5~7.5) 为主。在 4~6、14~16、25~30、50~60 cm 沉积物样品中, pH 值介于弱酸性到中性 (6.0~7.5) 的样品比例分别为 76.2%、76.2%、71.4% 和 66.7%, 而其余样品则主要以酸性土壤为主, 只有极少部分属于碱性土壤 (7.5<pH<8.5)。参照国际制土壤质地分级标准^[23]对大堡沉积物进行粒径分布分析, 结果如图 2: 大堡库区沉积物粒径组成分布于壤土和砂土区域, 以壤土为主, 其中 4~6、14~16、25~30、50~60 cm 壤土占比分别为 95.2%、81.0%、76.2% 和 84.2%。导致土壤养分不同的最主要内在原因是土壤的颗粒组成^[24]。砂土主成分颗粒粒径较大, 比表面积较小, 吸附养分能力弱, 加之土质稀疏, 使得土壤养分易流失; 而黏土主成分颗粒小, 土质密实, 吸附养分能力强, 但雨水下渗困难, 影响农作物根系生长; 壤土粒径组成介于砂土

和黏土之间, 兼具二者优点。学者针对砂土、壤土、黏土不同壤质类型土壤进行种植试验, 得出壤土更适合植物根系生长发育及产量形成的结论^[25-26]。综上可知, 碧流河水库大堡库区沉积物在 pH、壤质类型等基本性质方面适宜植物生长。

2.2 养分丰富度

表 2 为大堡库区各层沉积物有机质含量统计表。由于碧流河水库地处辽宁省普兰店、庄河及盖州交界处, 其中土壤有机质数据为统计分析该三市土壤数据, 来源于全国第二次土壤普查农田肥力数据库。各层沉积物平均有机质含量分别为 35.77、27.22、29.69、27.13 g·kg⁻¹, 参照全国第二次土壤普查分级标准^[27], 大堡沉积物有机质平均含量达到 2~3 级, 中上-高水平。参照流域土壤平均有机质含量 18.03 g·kg⁻¹, 库区各层沉积物有机质含量高于流域土壤有机质平均含

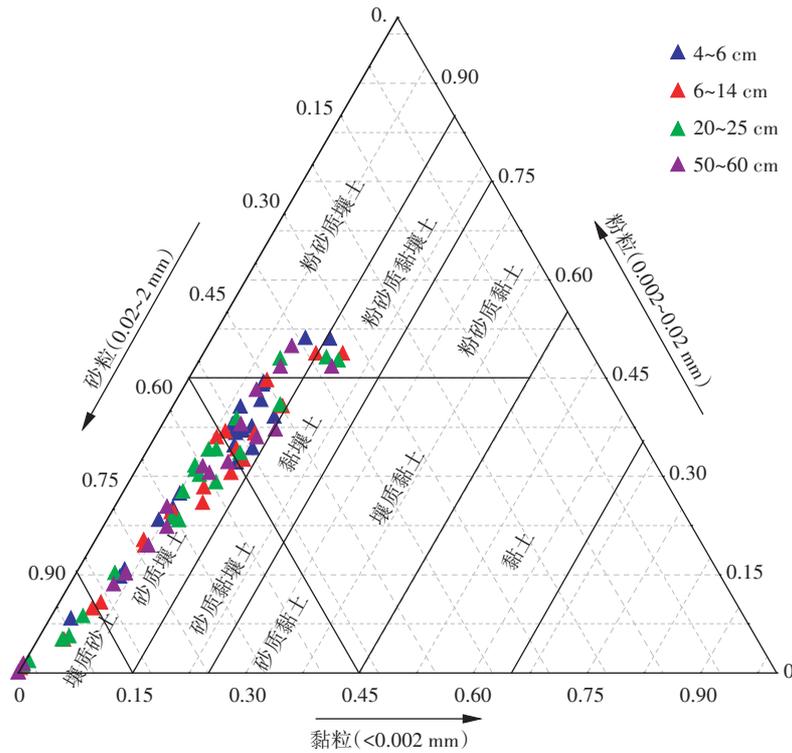


图 2 大堡库区各采样点沉积物壤质类型图

Figure 2 The soil type of sediment samples in each sediment layer of Dapu area

表 2 大堡库区沉积物样品有机质含量

Table 2 The organic matter contents of sediment samples in Dapu area

沉积物层	4~6 cm	14~16 cm	25~30 cm	50~60 cm	流域土壤平均
变幅/g·kg ⁻¹	13.29~58.18	6.25~69.48	6.68~56.68	3.90~51.52	10.80~35.30
平均值/g·kg ⁻¹	35.77	27.22	29.69	27.13	18.03
标准差/g·kg ⁻¹	11.78	14.06	13.85	13.77	7.11
变异系数	0.33	0.52	0.47	0.51	0.39

量的采样点所占比例分别为90.5%、76.2%、81.0%和72.2%,高于流域土壤有机质最小值所占比例分别为100%、81.0%、85.7%和83.3%。据课题组已有研究^[28],大堡库区沉积物总氮、总磷平均含量分别为2.2、0.45 g·kg⁻¹,分别达1级、很高水平和4级、中下水平,均高于流域土壤总氮、总磷平均值0.94、0.36 g·kg⁻¹。可见,大堡沉积物经适当无害化处理后用作流域种植土,其养分含量完全满足流域种植所需,且养分富余,具有巨大潜力。

2.3 重金属污染水平

统计分析大堡库区各层沉积物重金属含量数据如表3所示。对比各类土壤标准限值,可知大堡沉积物Cu、Cd、Pb和Zn含量均远低于《GB 4284—1984 农用污泥中污染物控制标准》^[29]限值;其中Cu、Pb、Zn含

量符合《HJ 350—2007A 展览会用地土壤环境质量评价标准(暂行)》^[30]A级标准,Cd含量符合B级标准;参照《HJ/T 332—2006 食用农产品产地环境质量评价标准》^[31],Cu、Pb、Zn的平均含量符合标准要求,而Cd的平均含量超标5倍以上。目前国内外土壤Fe、Mn含量无相关标准要求。综上,就重金属含量方面而言,大堡沉积物用于场馆、绿化、商业及公共市政用地等不会威胁人类身体健康,而用于种植土壤等直接暴露于人体的土壤类型存在潜在风险。鉴于碧流河水库流域土地利用类型以耕地、林地和村落占地为主,有必要对大堡沉积物重金属含量进行风险评估,以确定其应用于I类土壤的风险性。

2.4 重金属评价结果

重金属评价结果如表4所示。大堡各层沉积物

表3 大堡库区沉积物样品重金属含量表

Table 3 The heavy metal content values of sediment samples in Dapu area

样品来源	项目	Fe	Mn	Cu	Cd	Pb	Zn
4~6 cm	最小值/mg·kg ⁻¹	2.77×10 ⁴	4.05×10 ²	18.20	1.50	28.65	91.95
	最大值/mg·kg ⁻¹	4.74×10 ⁴	7.75×10 ²	31.34	2.29	82.50	148.41
	平均值/mg·kg ⁻¹	3.35×10 ⁴	5.23×10 ²	25.92	1.86	61.44	124.89
	标准差/mg·kg ⁻¹	4.47×10 ³	88.25	3.53	0.22	13.72	13.41
	变异系数	0.13	0.17	0.14	0.12	0.22	0.11
14~16 cm	最小值/mg·kg ⁻¹	2.45×10 ⁴	3.35×10 ²	12.40	1.19	25.41	78.45
	最大值/mg·kg ⁻¹	3.84×10 ⁴	6.63×10 ²	30.81	2.11	84.42	160.34
	平均值/mg·kg ⁻¹	3.15×10 ⁴	5.19×10 ²	21.60	1.79	55.57	110.57
	标准差/mg·kg ⁻¹	3.68×10 ³	86.91	5.33	0.26	14.84	23.35
	变异系数	0.12	0.17	0.25	0.14	0.27	0.21
25~30 cm	最小值/mg·kg ⁻¹	1.88×10 ⁴	2.85×10 ²	12.45	1.28	24.60	76.40
	最大值/mg·kg ⁻¹	4.63×10 ⁴	6.88×10 ²	32.84	2.29	91.25	148.87
	平均值/mg·kg ⁻¹	3.12×10 ⁴	5.21×10 ²	22.70	1.82	50.43	111.05
	标准差/mg·kg ⁻¹	6.06×10 ³	1.19×10 ²	5.75	0.24	13.88	19.63
	变异系数	0.19	0.23	0.25	0.13	0.28	0.18
50~60 cm	最小值/mg·kg ⁻¹	1.43×10 ⁴	3.16×10 ²	14.35	0.91	18.28	85.82
	最大值/mg·kg ⁻¹	4.86×10 ⁴	8.75×10 ²	30.20	2.29	82.28	144.85
	平均值/mg·kg ⁻¹	2.94×10 ⁴	5.10×10 ²	22.54	1.84	50.22	107.58
	标准差/mg·kg ⁻¹	6.84×10 ³	1.16×10 ²	4.29	0.32	14.45	14.45
	变异系数	0.23	0.23	0.19	0.17	0.29	0.13
SAU	pH<6.5	—	—	250	5	300	500
	pH≥6.5	—	—	500	20	1000	1000
SES	A级	—	—	63	1	140	200
	B级	—	—	600	22	600	1500
SEAP	pH<6.5	—	—	50	0.3	50	200
	6.5≤pH≤7.5	—	—	100	0.3	50	250

注:SAU代表农用污泥中污染物控制标准;SES代表展览会用地土壤环境质量标准;SEAP代表食用农产品产地土壤环境质量标准。

Note:SAU represents the control standards for pollutants in sludge for agricultural use, while SES and SEAP respectively represents the standard of soil quality assessment for exhibition sites and the farmland environmental quality evaluation standards for edible agricultural products.

表4 大堡沉积物重金属评价结果

Table 4 The evaluation results of heavy metals in Dapu area

沉积物	Fe	Mn	Cu	Cd	Pb	Zn	RI
4~6 cm	100%- I	100%- I	100%- I	100%- V	100%- I	100%- I	100%-IV
14~16 cm	100%- I	100%- I	100%- I	100%- V	100%- I	100%- I	100%-IV
25~30 cm	100%- I	100%- I	100%- I	100%- V	100%- I	100%- I	100%-IV
50~60 cm	100%- I	100%- I	100%- I	100%- V	100%- I	100%- I	100%-IV

中,Cd污染最为严重,各层沉积物样品中Cd含量均处于V级(严重)污染水平,而Fe、Mn、Cu、Pb和Zn含量均属于I级(低)污染水平,重金属综合污染水平为IV级(严重)水平,其中Cd污染指数占综合污染指数的比例为94.2%~98.2%。这表明大堡沉积物用于任意类型土壤,Fe、Mn、Cu、Pb和Zn含量具有较低风险,Cd污染严重,整体重金属污染水平为严重。

消落区大堡库区部分区域常被当地居民私自耕种,且种植多年,具体分布区域见图1种植区。为进一步确定大堡沉积物用作种植土的可能性,对比分析大堡库区全局和种植区超标、存在潜在威胁的重金属Cd含量数据如图3所示,可见种植区各层沉积物Cd含量变化均落于大堡库区含量变化范围内,并集中分布于库区平均值左右。大堡库区Cd污染来源相同,然而种植多年其Cd含量相对于库区未出现异常偏低情况,即种植区多年耕作农作物对Cd未出现明显富集现象,可能与大堡沉积物Cd的各形态含量有关,故不排除大堡沉积物可直接用于安全种植土的可能性。但为保证大堡库区沉积物安全用于种植土,可考虑与原种植土以一定比例混合均匀后利用。

2.5 养分利用分析

由前文分析可知大堡沉积物有机质含量较高且变幅较大,为保证有机质的充分利用,本文选用地理信息系统 ArcGis 10.1 空间分析模块对有机质含量空间分布进行分析,结果如图4所示。可见大堡沉积物

有机质含量分布具有区域性,表现出低有机质含量区域主要分布于河道右岸、高含量区域主要分布于主洪区和国道附近的特征。已有研究表明,土壤有机质通过吸附、络合、螯合等化学作用影响土壤重金属的积累及其有效性^[32-34],故采用SPSS 17.0对大堡沉积物有机质与具有潜在风险的Cd含量进行相关性分析,结果(表5)表明,大堡沉积物有机质与Cd含量并无相关性,即有机质的充分利用不受Cd污染影响。综上,大堡沉积物进行再利用时,为保证有机质资源的充分利用,可考虑分层分区方法进行循环再利用。

3 结论

对大堡沉积物进行土地利用可行性及利用类型分析发现:

(1)大堡库区不同层沉积物弱酸性到中性土比例在66.7%及以上。

(2)据粒径分布分析各层沉积物壤土比例分别达76.2%及以上;各层有机质平均含量属于中上-高水平,81.0%以上的沉积物样品有机质含量高于流域农田土壤有机质含量最小值,各层沉积物整体养分富余。

(3)各层沉积物重金属Fe、Mn、Cu、Cd、Pb和Zn含量中,除Cd含量外均低于标准限值;基于重金属评价可知,大堡沉积物直接用于I类土壤,Cd存在严重潜在危害,整体重金属污染水平为严重,但不排除可用于正常种植生产的可能。

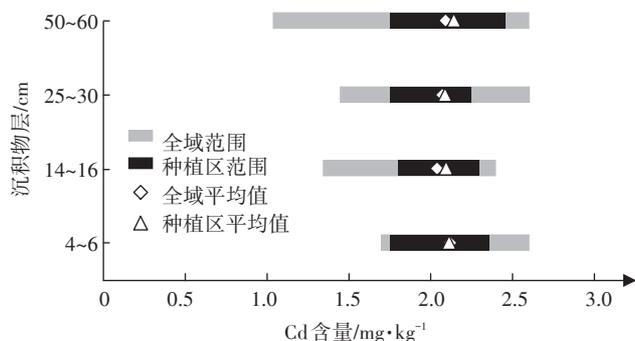


图3 大堡库区及种植区Cd含量对比图

Figure 3 Cd contents in Dapu area and the plant area

表5 各层有机质与Cd含量的相关性分析

Table 5 The correlation analysis of Cd and organic matter in each sediment layer

有机质来源	Cd		
	相关系数	P	N
4~6 cm	-0.132	0.567	21
14~16 cm	0.347	0.124	21
25~30 cm	0.157	0.498	21
50~60 cm	0.195	0.439	18

注:P为显著性值,N为样本数。

Note:P is the significance value, and N is the number of samples.

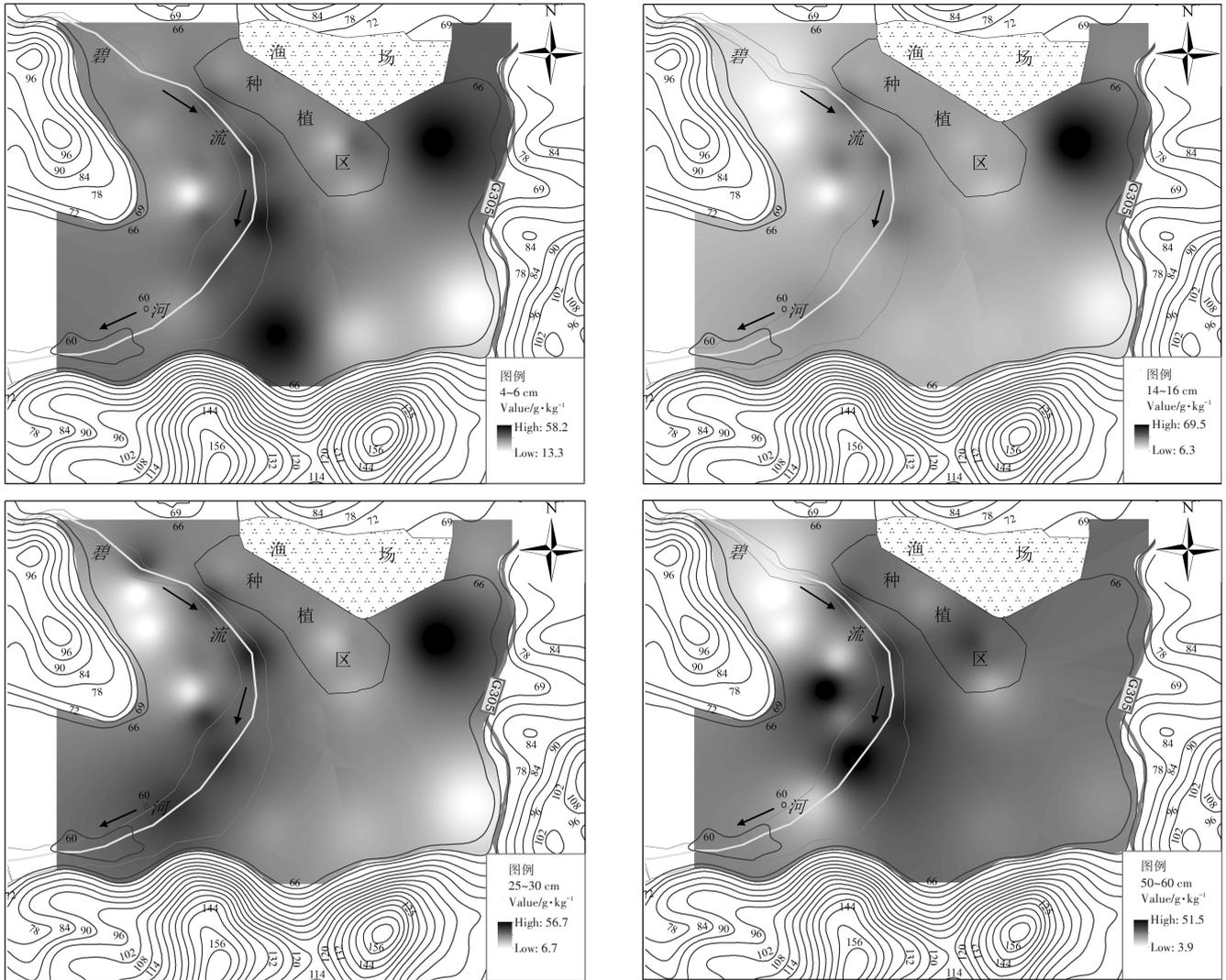


图4 大堡库区不同层沉积物有机质含量空间分布图

Figure 4 The distribution of organic matter in each sediment layer in Dapu area

(4)有机质含量具有分层分区域特性,且与Cd含量不存在相关性,大堡沉积物有机质可进行分层分区域利用以保证沉积物养分的充分利用。

综上所述:碧流河水库大堡库区沉积物可安全用于场馆、绿化、商业、公共市政用地等Ⅱ类土地利用类型,用于Ⅰ类直接暴露于人体的土壤,存在Cd污染威胁,可考虑简单预处理后利用。

参考文献:

- [1] 沈崇刚. 中国大坝建设现状及发展[J]. 中国电力, 1999, 32(12): 14-21.
SHEN Chong-gang. Present status and development of Chinese large dam construction[J]. *Electric Power*, 1999, 32(12): 14-21.
- [2] 姜乃森, 傅玲燕. 中国的水库泥沙淤积问题[J]. 湖泊科学, 1997, 9(1): 1-8.
JIANG Nai-sen, FU Ling-yan. Sedimentation problem of reservoir in

- China[J]. *Journal of Lake Sciences*, 1997, 9(1): 1-8.
- [3] 姜乃森. 多沙河流域水库淤积问题的调查研究[J]. 泥沙研究, 1980(1): 102-112.
JIANG Nai-sen. Investigation and study on the siltation problem of reservoir with heavily silt-carrying river[J]. *Journal of Sediment Research*, 1980(1): 102-112.
- [4] 杜殿勋, 戴明英. 三门峡水库修建前后渭河下游河道泥沙问题的研究[J]. 泥沙研究, 1981(3): 1-18.
DU Dian-xu, DAI Ming-ying. Study on the sediment problems of lower Weihe river before and after the construction of Sanmenxia reservoir[J]. *Journal of Sediment Research*, 1981(3): 1-18.
- [5] 王开荣, 李文学, 郑春梅. 黄河泥沙处理对策的发展, 实践与认识[J]. 泥沙研究, 2002(6): 26-30.
WANG Kai-rong, LI Wen-xue, ZHENG Chun-mei. Development, practice and understanding of sediment treatment of the Yellow River [J]. *Journal of Sediment Research*, 2002(6): 26-30.
- [6] 周建军, 林秉南, 张仁. 三峡水库减淤增容调度方式研究: 双汛限

- 水位调度方案[J]. 水利学报, 2000, 10(10):1-11.
ZHOU Jian-jun, LIN Bing-nan, ZHANG Ren. An optimized operation scheme for reducing deposition and enhancing flood control capacity of the Three Gorges Project Reservoir[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2000, 10(10):1-11.
- [7] 韩其为. 论水库的三角洲淤积(一)[J]. 湖泊科学, 1995, 7(2):107-118.
HAN Qi-wei. Delta deposition in reservoir(I)[J]. *Journal of Lake Sciences*, 1995, 7(2):107-118.
- [8] Mendonça R, Müller R A, Clow D, et al. Organic carbon burial in global lakes and reservoirs[J]. *Nature Communication*, 2017, 8(1):1-7.
- [9] Jia X, Luo W, Wu X, et al. Historical record of nutrients inputs into the Xin'an reservoir and its potential environmental implication[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, 24(25):20330-20341.
- [10] 许士国, 汪天祥. 水库内源污染蓄积过程及影响研究综述[J]. 水利水电科技进展, 2015, 35(5):162-167.
XU Shi-guo, WANG Tian-xiang. Review of research on accumulation process and effect of internal pollution of reservoir[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2015, 35(5):162-167.
- [11] Liu W, Ma L, Wu J, et al. Environmental variability and human activity over the past 140 years documented by sediments of Ebinur Lake in arid central Asia[J]. *Journal of Limnology*, 2017, 76(3):534-545.
- [12] Gürevin C, Erturk A, Albay M. Predicting the effects of sediment based internal nutrient loads on eutrophication in Küçükçekmece Lagoon for rehabilitation planning[J]. *International Journal of Sediment Research*, 2017, 32(4):527-554.
- [13] 薄录吉, 王德建, 颜晓, 等. 底泥环保资源化利用及其风险评价[J]. 土壤通报, 2013, 44(4):1017-1024.
BO Lu-ji, WANG De-jian, YAN Xiao, et al. Environmental resource utilization and risk assessment of dredged sediments: A review[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2013, 44(4):1017-1024.
- [14] ISO. 10390 Soil quality, determination of pH[S]. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization, 2005.
- [15] 李志亮, 杜小如. 沉积物粒度参数求解方法的对比[J]. 长江科学院院报, 2008, 25(4):16-19.
LI Zhi-liang, DU Xiao-ru. Comparison of methods solving sediment particle size parameters[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2008, 25(4):16-19.
- [16] Heiri O, Lotter A F, Lemcke G. Loss on ignition as a method for estimating organic and carbonate content in sediments: Reproducibility and comparability of results[J]. *Journal of Paleolimnology*, 2001, 25(1):101-110.
- [17] 钱宝, 刘凌, 肖潇. 土壤有机质测定方法对比分析[J]. 河海大学学报:自然科学版, 2011, 39(1):34-38.
QIAN Bao, LIU Ling, XIAO Xiao. Comparative tests on different methods for content of soil organic matter[J]. *Journal of Hohai University: Natural Sciences*, 2011, 39(1):34-38.
- [18] 朱广伟, 秦伯强, 高光, 等. 灼烧对沉积物烧失量及铁、磷测定的影响[J]. 分析试验室, 2004, 23(9):72-76.
ZHU Guang-wei, QIN Bo-qiang, GAO Guang, et al. Effects of ignition on determination of loss on ignition, iron and phosphorus in sediments[J]. *Chinese Journal of Analysis Laboratory*, 2004, 23(9):72-76.
- [19] Ouchir N, Ben Aissa L, Boughdiri M, et al. Assessment of heavy metal contamination status in sediments and identification of pollution source in Ichkeul Lake and rivers ecosystem, northern Tunisia[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2016, 9(9):539.
- [20] 徐争启, 倪师军, 庾先国, 等. 潜在生态危害指数法评价中重金属毒性系数计算[J]. 环境科学与技术, 2008, 31(2):112-115.
XU Zheng-qi, NI Shi-jun, TUO Xian-guo, et al. Calculation of heavy metals' toxicity coefficient in the evaluation of potential ecological risk index[J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, 31(2):112-115.
- [21] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control: A sedimentological approach[J]. *Water Research*, 1980, 14(8):975-1001.
- [22] 沈烈英, 王智勇, 崔心红, 等. 上海城市污泥在滨海盐渍土绿化中的应用研究与探索[M]. 上海:上海科学技术出版社, 2012.
SHEN Lie-ying, WANG Zhi-yong, CHUI Xin-hong, et al. Study and exploration on application of Shanghai urban sludge in coastal salty soil afforestation[M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 2012.
- [23] 张世文, 王胜涛, 刘娜, 等. 土壤质地空间预测方法比较[J]. 农业工程学报, 2011, 27(1):332-339.
ZHANG Shi-wen, WANG Sheng-tao, LIU Na, et al. Comparison of spatial prediction method for soil texture[J]. *Transactions of the CSAE*, 2011, 27(1):332-339.
- [24] 毕银丽, 王百群, 郭胜利, 等. 黄土丘陵区坝地系统土壤养分特征及其与侵蚀环境的关系: II. 坝系土壤粒径分布及各粒径的养分状况[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1997, 3(4):38-44.
BI Yin-li, WANG Bai-qun, GUO Sheng-li, et al. Characteristic of soil nutrient in dam system and its relation with erosion environment in the loess hilly region: II. Particles distribution and its nutrient condition in dam system soil[J]. *Journal of Soil Erosion and Soil and Water Conservation*, 1997, 3(4):38-44.
- [25] 贾立华, 赵长星, 王月福, 等. 不同质地土壤对花生根系生长、分布和产量的影响[J]. 植物生态学报, 2013, 37(7):684-690.
JIA Li-hua, ZHAO Chang-xing, WANG Yue-fu, et al. Effects of different soil textures on the growth and distribution of root system and yield in peanut[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2013, 37(7):684-690.
- [26] 韩巧霞, 郭天财, 阎凌云, 等. 土壤质地对小麦旗叶部分生理活性的影响[J]. 麦类作物学报, 2009, 29(4):639-642.
HAN Qiao-xia, GUO Tian-cai, YAN Ling-yun, et al. Effects of soil textures on some physiological functions of flag leaves of wheat[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2009, 29(4):639-642.
- [27] 周伟, 王文杰, 张波, 等. 长春城市森林绿地土壤肥力评价[J]. 生态学报, 2017, 37(4):1211-1220.
ZHOU Wei, WANG Wen-jie, ZHANG Bo, et al. Soil fertility evaluation for urban forests and green spaces in Changchun City[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(4):1211-1220.
- [28] 汪天祥. 水库水质动态分层监测分析与评价研究[D]. 大连:大连理

- 工大学, 2016.
- WANG Tian-xiang. Dynamic stratified monitoring analysis and evaluation on reservoir water quality[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2016.
- [29] 城乡建设环境保护部. GB 4284—1984 农用污泥中污染物控制标准[S]. 1985.
- People's Republic of China Urban and Rural Construction and Environmental Protection Department. GB 4284—1984 Control standards for pollutants in sludges from agricultural use[S]. 1985.
- [30] 国家质量监督检验检疫总局, 国家环境保护总局. HJ 350—2007 展览会用地土壤环境质量评价标准(暂行)[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2007.
- State Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine, State Environmental Protection Administration. HJ 350—2007 Standard of soil quality assessment for exhibition sites[S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2007.
- [31] 国家环境保护总局. HJ/T 332—2006 食用农产品产地环境质量评价标准[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2007.
- State Environmental Protection Administration. HJ/T 332—2006 Farmland environmental quality evaluation standards for edible agricultural products[S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2007.
- [32] Kirkham M B. Cadmium in plants on polluted soils: Effects of soil factors, hyperaccumulation, and amendments[J]. *Geoderma*, 2006, 137(1-2): 19-32.
- [33] Covelo E F, Vega F A, Andrade M L. Competitive sorption and desorption of heavy metals by individual soil components[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2007, 140(1-2): 308-315.
- [34] Cai L, Huang L, Zhou Y, et al. Heavy metal concentrations of agricultural soils and vegetables from Dongguan, Guangdong[J]. *Journal of Geographical Science*, 2010, 20(1): 121-134.