

北京密云水库内湖消落带有机质、营养盐(氮/磷)含量分布特征*

秦丽欢^{1,2}, 曾庆慧^{1,2}, 李叙勇^{1**}, 秦耀民¹

(1: 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085)

(2: 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 消落带是河流、湖泊和水库特有的一种现象,也是水陆生态系统间物质能量转换最活跃、最重要的区域,消落带的淹水-落干的频率和时间对消落带有机质和营养盐的形态转化与水界面的交换过程有重要影响. 在密云水库的平水期(3月),对内湖消落带有机质、氮、磷含量分布进行调查,研究不同高程、土地利用和土壤深度的情况下,有机质和各营养盐含量的分布情况及相关关系,计算有机质和各营养盐在各高程下的储量,为消落带氮磷入库风险负荷量的评估,维护密云水库的水质安全提供依据. 结果表明,密云水库内湖消落带有机质、总磷、总氮、氨氮、硝态氮、亚硝态氮和无机磷含量分别为 23.15 ± 13.65 mg/g, 0.17 ± 0.09 mg/g, 1.44 ± 0.81 mg/g, 10.86 ± 3.54 μ g/g, 8.07 ± 2.73 μ g/g, 0.41 ± 0.71 μ g/g, 9.09 ± 4.18 μ g/g; 土地利用情况对总氮、氨氮和硝态氮含量影响较大,而对有机质和总磷含量分布没有显著影响;在垂直分布上,有机质、总磷和总氮含量有随土壤深度增加而降低的趋势;利用相关分析得出有机质和土壤水分是影响氮、磷转化的重要因素;133~146 m 高程范围内有机质、总磷和总氮的储量分别为 5324.07、59.56 和 414.02 t. 密云水库内湖消落带是有机质和营养盐的重要贮存库.

关键词: 消落带;有机质;氮;磷;密云水库;高程;土地利用;土壤深度

Distribution of organic matter and nutrient content in water-level-fluctuating zone of Miyun Reservoir inner lake, Beijing

QIN Lihuan^{1,2}, ZENG Qinghui^{1,2}, LI Xuyong^{1**} & QIN Yaomin¹

(1: State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Science, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, P.R.China)

(2: University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, P.R.China)

Abstract: Water-level-fluctuating zone (WLFZ) is a special phenomenon for rivers, lakes and reservoirs. It is also the most active and important zone for water and soil matter and energy exchange. The shifts between wet and dry period affects the nutrient transformation of WLFZ and water-soil exchange. In normal water season of Miyun Reservoir, the organic matter (OM) and nutrient content (N and P) of the water-level-fluctuating zone of inner lake was investigated, while the correlation among the soil physical chemical characteristics, OM and nutrient content was also analyzed. Results indicated that the content of organic matter, total phosphorus, total nitrogen, ammonia nitrogen, nitrate nitrogen, inorganic phosphorus of inner lake of Miyun Reservoir was 23.15 ± 13.65 mg/g, 0.17 ± 0.09 mg/g, 1.44 ± 0.81 mg/g, 10.86 ± 3.54 μ g/g, 8.07 ± 2.73 μ g/g, 0.41 ± 0.71 μ g/g, 9.09 ± 4.18 μ g/g, respectively; Land use had impacts on content of total nitrogen, ammonia nitrogen, nitrate nitrogen, had no impact on the content of organic matter and total phosphorus. For the vertical distribution, organic matter, total phosphorus, total nitrogen all decreased with the soil depth increase. Correlation analysis showed that water content and organic matter were important factors for nitrogen and phosphorus transform. The reserve of organic matter, total nitrogen, total phosphorus in area between 133 - 146 m was 5324.07, 59.56 and 414.02 t, respectively. So the water-level-fluctuating zone was a very important OM and nutrient storage area. To keep the water quality, further studies about it were very necessary.

* 中国科学院“一三五”战略发展规划重点项目(YSW2013B02-4)、城市与区域生态国家重点实验室科研专项(SK-LURE2013-1-05)和国家水体污染控制与治理科技重大专项(2014ZX07203010)联合资助. 2015-07-15 收稿; 2015-12-01 收修改稿. 秦丽欢(1987~), 女, 博士研究生; E-mail: proveqinlh@163.com.

** 通信作者; E-mail: xyli@cees.ac.cn.

Keywords: Water-level-fluctuating zone; organic matter; nitrogen; phosphorus; Miyun Reservoir; altitude; land use; soil depth

消落带是河流、湖泊、水库特有的一种现象,主要由于湖库河水位的季节性消涨和周期性蓄水,形成的分布在最高水位线与最低水位线之间的区域^[1].消落带是衔接水-陆生态系统的生态交错带,同时也是水陆生态系统间物质能量转换最活跃、最重要的区域^[2-3].消落带由于阶段性的淹没-落干过程,使其在营养盐的分布和贮存方面与长期处于淹水状态的沉积物存在明显差异,消落带的淹水-落干的频率和时间对消落带营养盐的形态转化与水界面的交换过程有重要影响.周期性的淹水对消落带的影响主要表现,导致土壤中的氮磷营养盐向水中转移,造成水体的富营养化,影响母岩养分的释放^[4-5].有研究表明,消落带是库区流域富营养化的主要来源^[6].因此研究消落带营养盐的储量和分布情况,对进一步管理和防护水体富营养化有显著作用和意义^[7].

目前,国内外针对消落带的研究侧重各有不同,国外的研究对象大多针对河流^[8]、湖泊^[9-11]以及湿地^[12-13]自然水位的涨落或者强降雨事件下消落带与水界面进行的物质交换及营养盐的形态转化,而国内对消落带的研究则集中在三峡地区^[14-17],由人为对水资源的调控造成的水位落差形成的消落带.

然而,密云水库作为北京市重要的饮用水源地,同样值得关注.密云水库建于1960年,水库库容 $40 \times 10^8 \text{ m}^3$,多年蓄水量为 $6.5 \times 10^8 \sim 12 \times 10^8 \text{ m}^3$,历年水位在131~137 m之间.由于受到降雨和人为调控水量的影响,其水位呈现出季节性的波动^[18],每年都会形成1~4 m左右的消落带.除此之外,考虑到“南水北调”工程作为一项浩大的国家性工程,为流经城市带来珍贵的水资源之外,可能也会对受水区的生态环境带来影响.由于密云水库是“南水”调入北京的储存库,一方面水库的水源得到补给,另一方面由于储量的增加,势必在原有基础上水位有所抬升,最初的消落带可能会成为永久的淹没带,库岸带部分也会有新的消落带形成.这对密云水库的水质安全可能造成一定的风险.因此,本研究以密云水库内湖为研究对象,考虑到“南水北调”来水后,不同时间段对水量有不同调度要求,蓄水量可能存在阶段性变化,将蓄水量分 $12 \times 10^8 \text{ m}^3$ (对应水位137 m)、 $17 \times 10^8 \text{ m}^3$ (对应水位142 m)、 $22.3 \times 10^8 \text{ m}^3$ (对应水位146 m)和 $30 \times 10^8 \text{ m}^3$ (对应水位152 m)4个阶段,研究分析4个不同高程下(133~137、137~142、142~146、146~152 m)消落带碳、氮、磷的分布特征,为评估消落带氮、磷入库风险负荷量,维护密云水库的水质安全提供依据.

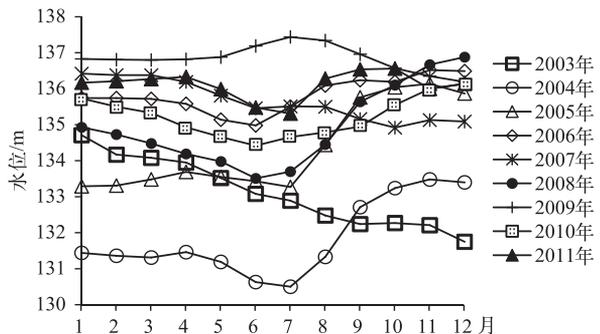


图1 密云水库2003—2011年水位变化

Fig.1 Water-level fluctuation of Miyun Reservoir from 2003 to 2010

1 材料与方法

1.1 采样点设置与样品采集

消落带样品于2012年3月进行采集,采样点主要分布在内湖区域.采集不同高程梯度(133~137、137~142、142~146、146~152 m)、土层深度(0~20 cm,现场5 cm分层)和土地利用类型(农田、草地、林地),共54个采样点(图2),112个消落带样品.采集的样品立即放入封口袋,4℃保存带回实验室,用于各指标分析.

1.2 样品分析方法

消落带样品总磷和有机磷分析方法采用欧洲标准测试委员会框架下发展的SMT(the Standards Measurements and Testing Program of the European Commission)法,即称取0.2 g样品,加20 ml 1 mol/L HCl,振荡16 h后提取无机磷;称取0.2 g样品,于450℃马弗炉中灰化3 h,加20 ml 3.5 mol/L HCl,振荡16 h后提取总磷,总磷和无机磷提取液采用钼锑抗分光法进行测定^[19-20].全氮含量采用凯氏定氮法测定,土壤有机质含量采用重铬酸钾氧化-外加加热法测定^[21],氨氮采用KCl浸提-蒸馏法测定,硝态氮采用酚二磺酸比色法测定^[22],

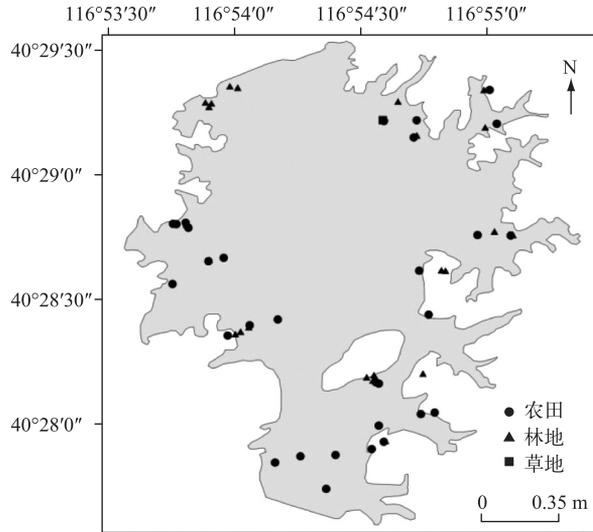


图2 密云水库内湖采样点分布

Fig.2 The distribution of sampling sites of inner lake in Miyun Reservoir

土壤含水率采用铝盒烘干差减法测定,容重采用环刀法进行^[23]测定.

1.3 数据处理和统计方法

研究数据中 Duncan 多重比较以及相关性分析均用 SPSS 16.0 软件进行统计分析,图表由 Excel 和 Origin 软件进行绘制. 消落带有有机质、总氮和总磷含量计算公式为:

$$F = \sum_{i=1}^n \frac{Con_{ik} \cdot \rho_{ik}}{100} \cdot Area_{ik} \cdot (1 - \varphi_{ik}/100) \cdot 10 \cdot L \quad (1)$$

式中, F 为研究区域内消落带有有机质、营养盐(碳、氮、磷)储量(t), n 为土层划分层数, L 为常数, 5 cm, 代表土层厚度(cm), Con_{ik} 、 ρ_{ik} 、 $Area_{ik}$ 和 φ_{ik} 分别代表第 i 层第 k 种土地利用类型的土壤全氮、全磷和有机质含量(g/kg)、土壤容重(g/cm³)、面积(m²)和含水率(%), 10 为单位转换系数.

2 结果与讨论

2.1 133~146 m 高程范围内消落带有有机质和营养盐含量

密云水库内湖 133~146 m 高程范围内农田和林地消落带(0~20 cm 均值)有机质、总磷、总氮、氨氮、硝态氮、亚硝态氮、无机磷含量分别为 23.15±13.65 mg/g、0.17±0.09 mg/g、1.44±0.81 mg/g、10.86±3.54 μg/g、8.07±2.73 μg/g、0.41±0.71 μg/g、9.09±4.18 μg/g. 土壤湿容重和含水率分别为 0.94±0.08 g/cm³ 和 12.54%±3.49% (表 1).

2.2 消落带有有机质和营养盐分布特征影响因素分析

2.2.1 高程对消落带(0~20 cm)有机质和营养盐含量的影响 同一高程,不同土地利用类型各营养盐含量有明显变化(表 1). 林地的有机质、总氮和硝态氮含量较高,分别是均值的 1.66、1.54、1.22 倍. 而农田的营养盐含量皆处于较低的水平,或与均值持平(无机磷、氨氮、硝态氮)或低于均值水平(总磷、有机质、总氮为均值的 0.7 倍). 因此分析高程对营养盐分布的影响,分别就同一土地利用类型进行讨论. 对林地而言,有机质和硝态氮受高程影响,主要表现在 133~137 m 和 142~146 m 有机质与硝态氮含量差异显著($P<0.05$),而 137~142 m 与 133~137 m 和 142~146 m 有机质和硝态氮含量差异不显著($P>0.05$). 对农田而言,133~137 与 137~142 m 高程范围为总氮和氨氮含量无显著差异($P>0.05$),而与 142~146 m 高程范围内总氮和氨氮含量具有显著差异($P<0.05$). 分析主要原因可能是目前密云水库的水位在 132~138 m 范围之间变动,对此范围的消落带影响更加频繁,因此 133~137 和 137~138 m 范围内消落带的总氮、氨氮无显著差异. 研究表明,一

定的淹没不利于氮磷元素的累积,同时也会加速氮的矿化^[24-25],因此在高程梯度上,总氮、氨氮、硝态氮含量总体表现是随着高程的增加而增加,这与水位的消长、氮元素的累积和矿化产生的影响不无关系。而高程对总磷和磷酸盐含量无显著影响($P>0.05$)。王业春等^[26]对三峡消落带的研究同样得到类似结果,这可能是因为不同高程的土壤母质具有相似性。

表1 消落带不同高程和土地利用情况下有机质和营养盐含量*

Tab.1 The organic matter and nutrient contents under different land use types and altitudes in the water-level-fluctuating zone

高程	土地利用类型	有机质/(mg/g)	总磷/(mg/g)	总氮/(mg/g)	氨氮/($\mu\text{g/g}$)	硝态氮/($\mu\text{g/g}$)	亚硝态氮/($\mu\text{g/g}$)	磷酸盐/($\mu\text{g/g}$)	湿容重/(g/cm^3)	含水率/%
133~137 m	农田	13.80±2.97 ^a	0.132±0.07 ^a	0.90±0.14 ^a	8.74±2.15 ^a	6.97±2.08 ^a	0.54±0.94 ^a	8.48±4.53 ^a	0.97±0.09 ^a	12.84±3.82 ^a
137~142 m	农田	14.23±4.85 ^a	0.14±0.07 ^a	0.87±0.20 ^a	7.38±1.89 ^a	6.73±3.99 ^a	0.15±0.04 ^a	8.67±4.11 ^a	0.95±0.04 ^a	11.16±2.29 ^a
142~146 m	农田	14.01±2.50 ^a	0.19±0.09 ^a	1.21±0.34 ^b	11.02±3.11 ^b	7.77±2.05 ^a	0.57±0.97 ^a	9.07±4.63 ^a	0.93±0.04 ^a	12.51±1.40 ^a
133~137 m	林地	41.765±20.17 ^a	0.21±0.052 ^a	1.58±0.83 ^a	12.04±3.81 ^a	7.15±1.31 ^a	0.13±0.08 ^a	9.51±2.35 ^a	0.93±0.15 ^a	13.02±0.77 ^a
137~142 m	林地	34.43±6.49 ^{ab}	0.21±0.13 ^a	2.08±0.91 ^a	13.43±2.55 ^a	9.16±1.72 ^{ab}	0.50±0.83 ^a	8.95±4.30 ^a	0.92±0.10 ^a	12.56±4.02 ^a
142~146 m	林地	32.50±4.38 ^b	0.17±0.08 ^a	2.34±0.51 ^a	14.19±2.68 ^a	11.10±2.76 ^b	0.31±0.08 ^a	10.68±4.5 ^a	0.95±0.07 ^a	13.02±2.77 ^a
133~146 m	均值	23.15±13.65	0.17±0.09	1.44±0.81	10.86±3.54	8.07±2.73	0.41±0.71	9.09±4.18	0.94±0.08	12.54±3.49

* 同一土地利用类型不同高程下有机质和各营养盐含量上标相同字母代表无显著差异($P>0.05$),不同字母代表有显著性差异($P<0.05$)。

2.2.2 土地利用类型对消落带(0~20 cm)有机质和营养盐含量的影响 土地利用类型对各营养盐含量的影响在不同高程情况下有所不同(表2)。在133~137、137~142 m高程范围内,土地利用类型对有机质、总氮和氨氮含量有显著影响($P<0.05$),在142~146 m高程范围内,土地利用类型对有机质、总氮和硝态氮含量有显著影响($P<0.05$)。在各高程范围内土地利用类型对总磷、磷酸盐含量影响不显著($P>0.05$)。有相关研究表明,不同土地植被覆盖下,土壤碳氮含量存在很大差异^[27-29],这可能是因为林地的枯落物丰富,且根系较多,交错复杂,其土壤具有良好透性,能够促进土壤微生物活动,对土壤氮素循环和土壤矿化过程有积极的促进作用^[30],所以林地

总氮和有机质含量比农田高(表1)。而农田和林地的总磷和磷酸盐含量差别较小,表明土地利用类型不是影响密云水库消落带总磷和磷酸盐含量的主要因素。

2.2.3 土壤深度对消落带总氮、总磷、有机质的影响 有机质、总磷和总氮含量随着深度的增加而递减(图4)。在133~137、137~142、142~146 m高程范围内,有机质随土层深度增加而降低,总磷、总氮含量变化趋势相似,先增高后降低,在5~10 cm土壤深度达最大值。说明有机质、总磷、总氮含量分布有较强的表聚性,有随土层增加而降低的趋势^[31-32]。此种现象可能与地表植被根系吸收土壤营养物质进行生长,再以枯落物的形式归还土壤,营养元素的循环过程有关^[33]。有机质、总磷和总氮含量在各土壤深度的变化范围也有明显趋势,其中0~5和5~10 cm的变异系数较大,在10~15、15~20 cm土壤深度变异系数较小,表明在表层0~10 cm土壤各营养物交换较为频繁,可能受地表覆盖物、表层水分及光照的影响较大。

2.3 消落带土壤基本理化特征及其与各营养盐间的相互关系

有机质与总氮、氨氮含量呈极显著正相关($P<0.01$)(表3),表明有机质与总氮、氨氮含量存在相似的

表2 农田与林地各营养盐差异性分析

Tab.2 Nutrient difference analysis between farmland and woodland

营养盐	133~137 m		137~142 m		142~146 m	
	F	Sig.	F	Sig.	F	Sig.
有机质	24.923	0.000*	10.446	0.007*	5.032	0.049*
总磷	4.323	0.056	1.187	0.297	0.192	0.670
总氮	8.309	0.012*	9.983	0.008*	8.032	0.018*
氨氮	4.856	0.045*	23.620	0.000*	2.893	0.120
硝态氮	0.026	0.874	2.436	0.145	5.730	0.038*
亚硝态氮	0.755	0.399	1.000	0.337	0.426	0.528
磷酸盐	0.185	0.674	0.015	0.904	0.328	0.579

* 代表农田与林地两组数据有显著性差异, $P<0.05$ 。

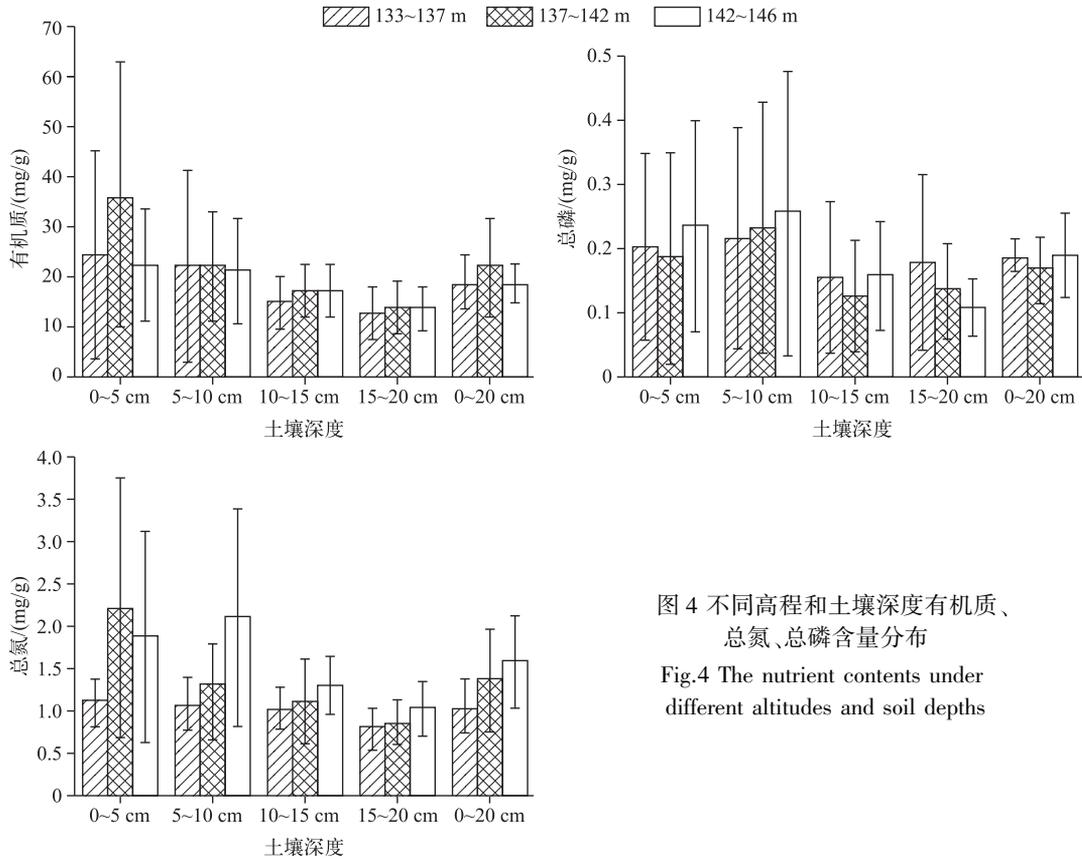


图4 不同高程和土壤深度有机质、总氮、总磷含量分布

Fig.4 The nutrient contents under different altitudes and soil depths

消长关系,这也与之前的研究结论一致^[34-35]. 总磷与磷酸盐、总磷与亚硝态氮含量呈显著正相关($P<0.05$),这与孙斌^[36]得到的结果一致. 硝态氮与含水率、磷酸盐与湿容重呈显著正相关($P<0.05$),由于土壤含水率与土壤容重的比值是常数,表明土壤水分可能是影响土壤硝态氮和磷酸盐的因素. 因土壤水分影响微生物的活性,从而影响氮磷的形态转化.

表3 消落带土壤基本理化特征及其与各营养盐间的相互关系

Tab.3 The correlationship among soil water content, bulk density and nutrient

	有机质	总磷	总氮	氨氮	硝态氮	亚硝态氮	磷酸盐	湿容重	含水率
有机质	1	0.136	0.656 **	0.604 **	0.307	-0.035	0.095	-0.162	0.233
总磷		1	0.046	0.161	-0.085	0.331 *	0.688 **	0.197	-0.346 *
总氮			1	0.833 **	0.608 **	-0.039	0.103	-0.056	0.209
氨氮				1	0.695 **	0.174	0.169	-0.022	0.203
硝态氮					1	0.142	0.130	-0.200	0.372 *
亚硝态氮						1	0.046	-0.196	0.023
磷酸盐							1	0.351 *	-0.289
湿容重								1	-0.717 **
含水率									1

* 代表 0.05 水平下显著相关, ** 代表 0.01 水平下显著相关;样本数 $n=40$.

2.4 消落带各营养盐储量估算

2.4.1 不同土壤深度各营养盐储量分布特征 内湖消落带 0~5、5~10、10~15、15~20 cm 土壤深度有机质储

量分别为 2630.27、1610.58、1268.07、974.57 t, 储量由表层到深层有逐渐降低的趋势; 总磷储量分别为 18.75、18.40、11.92、10.47 t, 表层 10 cm 磷储量差别不大, 随后有缓慢降低的趋势; 总氮储量分别为 142.20、117.38、89.73、64.70 t, 储量也随着土层深度增加而降低。

2.4.2 不同高程和土地利用类型各营养盐储量分布特征 在 133~137 和 137~142 m 高程范围内, 林地和农田中有有机质、总磷和总氮储量有显著变化。其中, 在 133~137 m 高程内, 农田的营养盐储量显著高于林地, 有机质、总磷和总氮储量分别为林地储量的 4.8、10.38 和 9.38 倍。而在 137~142 m 高程范围内, 林地有机质、总磷和总氮储量分别为农田的 1.7、2.8 和 4.1 倍。142~146 m 高程范围内, 林地与农田各营养盐含量差别不大(表 5)。

3 结论

1) 密云水库内湖消落带有机质、总磷、总氮、氨氮、硝态氮、亚硝态氮和无机磷含量分别为 23.15 ± 13.65 mg/g、 0.17 ± 0.09 mg/g、 1.44 ± 0.81 mg/g、 10.86 ± 3.54 μ g/g、 8.07 ± 2.73 μ g/g、 0.41 ± 0.71 μ g/g 和 9.09 ± 4.18 μ g/g。

2) 土地利用类型和高程是影响消落带有机质和氮含量的重要因素, 而对于磷的作用不显著。

3) 内湖消落带在 133~137 m 高程范围内有机质、总磷和总氮储量分别为 566.32、20.93 和 100.97 t; 137~142 m 高程范围内有机质、总磷和总氮储量分别为 2407.62、14.00 和 116.03 t, 有机质储量与 133~137 m 高程范围内差别较大, 总磷和总氮储量相近。在 133~146 m 高程范围内有机质、总磷和总氮的储量分别为 5324.07、59.56 和 414.02 t。

4) 因此, 需要加强对 133~142 和 142~146 m 高程范围的消落带进行防护, 以防止水位的波动使大量有机质和总氮进入水体。

5) 密云水库内湖消落带是巨大的有机质、氮磷等元素的储藏库, 阶段性的淹水-落干过程对水库水质有重要的影响, 需要进一步研究。

4 参考文献

- [1] Ai Lijiao, Wu Zhineng, Zhang Yinlong. A summary of water-level-fluctuating zone. *Ecological Science*, 2013, **32**(2): 259-264 (in Chinese with English abstract). [艾丽皎, 吴志能, 张银龙. 水体消落带国内外研究综述. 生态科学, 2013, **32**(2): 259-264.]
- [2] Guo Jinsong, Huang Xuanmin, Zhang Bin et al. Distribution characteristics of organic matter and total nitrogen in the soils of water-level-fluctuating zone of Three Gorges Reservoir area. *J Lake Sci*, 2012, **24**(2): 213-219 (in Chinese with English abstract). DOI 10.18307/2012.0207. [郭劲松, 黄轩民, 张彬等. 三峡库区消落带土壤有机质和全氮含量分布特征. 湖泊科学, 2012, **24**(2): 213-219.]
- [3] Fu Yangwu, Chen Mingjun, Pan Jie et al. Dynamic simulation of change of soil property of flooded-belt in Three Gorges Reservoir area after flooding. *Journal of Anhui Agricultural Science*, 2010, **38**(20): 10783-10784, 10821 (in Chinese with English abstract). [傅杨武, 陈明君, 潘杰等. 三峡库区消落带淹水后土壤性质变化的动态模拟. 安徽农业科学, 2010, **38**(20): 10783-10784, 10821.]

表 4 不同高程各土地利用类型面积(km²)

Tab.4 The different types of land use area in different altitudes

消落区	133~137 m	137~142 m	142~146 m	总计
草地	0.0223	0.0184	0.0067	0.0474
林地	0.0497	0.3294	0.3235	0.7026
农田	0.542	0.7669	0.4549	1.7638
总计	0.614	1.1147	0.7851	2.5138

表 5 不同高程下各土地利用类型有机质、总氮和总磷储量分布

Tab.5 The reserve of organic matter and total nitrogen, total phosphorus of different altitudes and land use types

高程	土地利用类型	有机质/t	总磷/t	总氮/t
133~137 m	林地	97.44	1.84	9.71
	农田	468.88	19.09	91.26
	合计	566.32	20.93	100.97
137~142 m	林地	1529.03	10.34	93.28
	农田	878.59	3.66	22.75
	合计	2407.62	14.00	116.03
142~146 m	林地	1296.27	9.97	106.90
	农田	1053.86	14.66	90.12
	合计	2350.13	24.63	197.02
133~146 m	合计	5324.07	59.56	414.02

- [4] Xie Deti, Fan Xiaohua, Wei Chaofu. Effects of riparian zone of the Three Gorges Reservoir on the water-soil environment of the area. *Journal of Southwest University: Natural Science*, 2007, **29**(1): 39-47(in Chinese with English abstract). [谢德体, 范小华, 魏朝富. 三峡水库消落区对库区水土环境的影响研究. 西南大学学报: 自然科学版, 2007, **29**(1): 39-47.]
- [5] Watts CJ. Seasonal phosphorus release from exposed, re-inundated littoral sediments of two Australian reservoirs. *Hydrobiologia*, 2000, **431**(1): 27-39.
- [6] Shi Xiaohong. Eutropication and phosphorus release of soil in drawdown area of Three Gorges Reservoir. *Soils and Fertilizers*, 2004, (1): 40-43(in Chinese with English abstract). [石孝红. 三峡库区消落区土壤磷素释放与富营养化. 土壤肥料, 2004, (1): 40-43.]
- [7] He Yang. Investigation of soil nitrogen and phosphorus in water fluctuation zone in central district of Three Gorges Reservoir area and analysis of its release potential[Dissertation]. Chongqing: Chongqing University, 2009(in Chinese with English abstract). [贺阳. 三峡库区腹心地带消落区土壤氮磷含量调查及其释放潜力分析[学位论文]. 重庆: 重庆大学, 2009.]
- [8] Surridge BWJ, Heathwaite AL, Baird AJ. The release of phosphorus to porewater and surface water from river riparian sediments. *Journal of Environmental Quality*, 2007, **36**(5): 1534-1544.
- [9] Yang Y, Yin X, Chen H *et al.* Determining water level management strategies for lake protection at the ecosystem level. *Hydrobiologia*, 2014, **738**(1): 111-127.
- [10] Skinner D, Oliver R, Aldridge K *et al.* Extreme water level decline effects sediment distribution and composition in Lake Alexandrina, South Australia. *Limnology*, 2014, **15**(2): 117-126.
- [11] Zohary T, Ostrovsky I. Ecological impacts of excessive water level fluctuations in stratified freshwater lakes. *Inland Waters*, 2011, **1**(1): 47-59.
- [12] Bostic EM, White JR. Soil phosphorus and vegetation influence on wetland phosphorus release after simulated drought. *Soil Science Society of America Journal*, 2007, **71**(1): 238-244.
- [13] Gilbert JD, Guerrero F, de Vicente I. Sediment desiccation as a driver of phosphate availability in the water column of Mediterranean wetlands. *Science of the Total Environment*, 2014, **466**: 965-975.
- [14] Zhan Yanhui, Wang Li'ao, Jiao Yanjing. Adsorption & release of nitrogen of soils in Three Gorges Reservoir. *Journal of Chongqing University: Natural Science Edition*, 2006, **29**(8): 10-13(in Chinese with English abstract). [詹艳慧, 王里奥, 焦艳静. 三峡库区消落带土壤氮素吸附释放规律. 重庆大学学报: 自然科学版, 2006, **29**(8): 10-13.]
- [15] Ma Limin, Zhang Ming, Teng Yanxing *et al.* Characteristics of phosphorous release from soil in periodic alternately water-logged and drained environments at WFZ of the Three Gorges Reservoir. *Environmental Science*, 2008, **29**(4): 1035-1039(in Chinese with English abstract). [马利民, 张明, 滕衍行等. 三峡库区消落区周期性干湿交替环境对土壤磷释放的影响. 环境科学, 2008, **29**(4): 1035-1039.]
- [16] Sun Wenbin, Du Bin, Zhao Xiulan *et al.* Fractions and adsorption characteristics of phosphorus on sediments and soils in water level fluctuating zone of Pengxi River, a tributary of Three Gorges Reservoir. *Environmental Science*, 2013, **34**(3): 1107-1113(in Chinese with English abstract). [孙文彬, 杜斌, 赵秀兰等. 三峡库区澎溪河底泥及消落区土壤磷的形态及吸附特性研究. 环境科学, 2013, **34**(3): 1107-1113.]
- [17] Zhou Xie, Yang Min, Lei Bo *et al.* Comprehensive assessment of eco-environmental quality of the water-level-fluctuating zone in the Three Gorges area based on PSR model. *Journal of Hydroecology*, 2012, **33**(5): 13-19(in Chinese with English abstract). [周谐, 杨敏, 雷波等. 基于 PSR 模型的三峡水库消落带生态环境综合评价. 水生态学杂志, 2012, **33**(5): 13-19.]
- [18] Yang M, Geng X, Grace J *et al.* Spatial and seasonal CH₄ flux in the littoral zone of Miyun Reservoir near Beijing; the effects of water level and its fluctuation. *PLoS ONE*, 2014, **9**(4): 1-9.
- [19] Ruban V, Brigault S, Demare D *et al.* An investigation of the origin and mobility of phosphorus in freshwater sediments from Bort-Les-Orgues Reservoir, France. *Journal of Environmental Monitoring*, 1999, **1**(4): 403-407.
- [20] Ruban V, López-Sánchez JF, Pardo P *et al.* Harmonized protocol and certified reference material for the determination of extractable contents of phosphorus in freshwater sediments—A synthesis of recent works. *Fresenius' Journal of Analytical Chemistry*, 2001, **370**(2): 224-228.
- [21] Guo Quanshui, Kang Yi, Zhao Yujuan *et al.* Changes in the contents of N, P, K, pH and organic matter of the soil which experienced the hydro-fluctuation in the Three Gorges Reservoir. *Scientia Silvae Sinicae*, 2012, **48**(3): 7-10(in Chinese with English abstract).

- English abstract). [郭泉水, 康义, 赵玉娟等. 三峡库区消落带土壤氮磷钾, pH 值和有机质变化. 林业科学, 2012, **48**(3): 7-10.]
- [22] Bao Shidan ed. Soil analysis method. Beijing: China Agriculture Press, 2005: 48-53(in Chinese). [鲍仕旦. 土壤农化分析. 北京: 中国农业出版社, 2005: 48-53.]
- [23] Yi Yanli ed. Soil study of physical method. Beijing: Peking University Press, 2009: 7-9(in Chinese). [依艳丽. 土壤物理研究法. 北京: 北京大学出版社, 2009: 7-9.]
- [24] Venterink HO, Davidsson TE, Kiehl K *et al.* Impact of drying and re-wetting on N, P and K dynamics in a wetland soil. *Plant and Soil*, 2002, **243**(1): 119-130.
- [25] Ding Qingzhang, Liu Xueqin, Zhang Xiaoke. Impacts of water level fluctuations on substrate environments of lakeshore zone of the lakes in the middle and lower reaches of Yangtze River. *J Lake Sci*, 2014, **26**(3): 340-348(in Chinese with English abstract). DOI 10.18307/2014.0302. [丁庆章, 刘学勤, 张晓可. 水位波动对长江中下游湖泊湖滨带底质环境的影响. 湖泊科学, 2014, **26**(3): 340-348.]
- [26] Wang Yechun, Lei Bo, Zhang Sheng. Differences in vegetation and soil characteristics at different water-level altitudes in the drawdown areas of Three Gorges Reservoir area. *J Lake Sci*, 2012, **24**(2): 206-212(in Chinese with English abstract). DOI 10.18307/2012.0206. [王业春, 雷波, 张晟. 三峡库区消落带不同水位高程植被和土壤特征差异. 湖泊科学, 2012, **24**(2): 206-212.]
- [27] Meng Linghan, Zeng Hui, Xiong Yanmei *et al.* Soil carbon, nitrogen and phosphorus contents and fine root biomass under different vegetation types and building densities in Shenzhen City. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2013, **49**(5): 899-907(in Chinese with English abstract). [孟令涵, 曾辉, 熊燕梅等. 深圳市不同建成区密度和植被类型下绿地土壤碳、氮、磷含量和细根生物量. 北京大学学报: 自然科学版, 2013, **49**(5): 899-907.]
- [28] Sharma P, Rai SC, Sharma R *et al.* Effects of land-use change on soil microbial C, N and P in a Himalayan watershed. *Pe-dobiologia*, 2004, **48**(1): 83-92.
- [29] Chen L, Qi X, Zhang X *et al.* Effect of agricultural land use changes on soil nutrient use efficiency in an agricultural area, Beijing, China. *Chinese Geographical Science*, 2011, **21**(4): 392-402.
- [30] Zhu Xiaolong, Zhang Linan, Geng Yanghui. The characteristics of soil nitrogen in *Pinus massoniana* forests of the Ruxi River Basin in the Three Gorges Reservoir region. *Journal of Southwest University: Natural Science Edition*, 2012, **34**(11): 88-94(in Chinese with English abstract). [朱小龙, 张丽楠, 耿养会等. 三峡库区汝溪河流域马尾松林地土壤氮素特性研究. 西南大学学报: 自然科学版, 2012, **34**(11): 88-94.]
- [31] Gou Lihui, Sun Zhaodi, Nie Lishui *et al.* Vertical distribution patterns of nitrogen, phosphorus, and potassium in Chinese pine forest soils developed from different parent materials in Songshan Mountain Nature Reserve, Beijing of China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, **24**(4): 961-966(in Chinese with English abstract). [苟丽晖, 孙兆地, 聂立水等. 北京松山自然保护区不同母质油松林土壤氮、磷、钾含量垂直分布. 应用生态学报, 2013, **24**(4): 961-966.]
- [32] Man Xiuling, Liu Bin, Li Yi. Distribution characteristics of organic carbon, nitrogen and phosphorus in the soils of herbaceous peat swamps in the Xiaoxing'an Mountains. *Journal of Beijing Forestry University*, 2010, **32**(6): 48-53(in Chinese with English abstract). [满秀玲, 刘斌, 李奕. 小兴安岭草本泥炭沼泽土壤有机碳、氮和磷分布特征. 北京林业大学学报, 2010, **32**(6): 48-53.]
- [33] Jobbágy EG, Jackson RB. The distribution of soil nutrients with depth: global patterns and the imprint of plants. *Biogeochemistry*, 2001, **53**(1): 51-77.
- [34] Lü Guohong, Zhou Li, Zhao Xianli *et al.* Vertical distribution of soil organic carbon and total nitrogen in reed wetland. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, **17**(3): 384-389(in Chinese with English abstract). [吕国红, 周莉, 赵先丽等. 芦苇湿地土壤有机碳和全氮含量的垂直分布特征. 应用生态学报, 2006, **17**(3): 384-389.]
- [35] Bai Junhong, Deng Wei, Zhang Yuxia *et al.* Spacial distribution characteristics of soil organic matter and nitrogen in the natural floodplain wetland. *Environmental Science*, 2002, **23**(2): 77-81(in Chinese with English abstract). [白军红, 邓伟, 张玉霞等. 洪泛区天然湿地土壤有机质及氮素空间分布特征. 环境科学, 2002, **23**(2): 77-81.]
- [36] Sun Bin. The study of water and sediment changes in carp pond of saline-alkali soil. *Hebei Fisheries*, 2012, (8): 13-16, 58(in Chinese with English abstract). [孙斌. 盐碱地主养鲤鱼池塘水质和底质变化的初步研究. 河北渔业, 2012, (8): 13-16, 58.]