

消落带土壤环境研究进展

艾丽蛟^{1,2}, 吴志能², 张银龙¹

(1. 南京林业大学 森林资源与环境学院, 江苏 南京 210037; 2. 重庆市风景园林科学研究院, 重庆 401329)

摘要:现从消落带土壤水分变化对适生植物的生理生态影响、消落带土壤重金属的分布特征与污染预警机制的研究、消落带土壤对氮磷等元素的吸附与释放特征研究、水位涨落后消落带土壤理化性质的变化, 以及水位变化对消落带土壤种子库的影响 5 个方面总结了国内外消落带土壤环境方面的研究进展, 并提出了今后消落带土壤环境研究方面的建议。

关键词:消落带; 土壤环境; 生态预警; 生态安全

中图分类号:X 53 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0009(2012)17-0199-05

消落带(Water-Level-Fluctuating Zone)是水库特有的一种现象, 是指水库由于季节性水位消涨而在最高水位线与最低水位线之间形成的消落带域。国外称为河岸带(Riparian Zone), 国内一般称为消落带、消落区或者消涨带。

国内外开展了大量有关消落带的研究。国外的研究主要集中在河岸带生态恢复^[1]、河岸带生态系统变化^[2]、河岸带植被演替^[3], 湿地岸边植被的恢复与重建^[4]、河岸带缓冲带对氮磷的净化机制研究^[5]、土地利用对河岸带的影响^[6]等方面。而国内关于消落带的研究重点在三峡库区消落带, 主要包括消落带生态环境问题、土地利用^[7]、土壤环境、植被恢复与生态重建^[8]等方面。

消落带土壤环境研究是消落带土地利用、适生植物筛选和生态重建的基础。目前, 国外主要研究水田、湖泊和湿地等区域的受淹土壤及水体沉积物对氮磷吸附及其迁移转化作用^[9], 而国内的研究主要集中在三峡库区消落带土壤水分的变化对适生植物的生理生态影响、消落带土壤重金属的分布特征与污染预警机制的研究、消落带土壤对氮磷等元素的吸附与释放特征研究、消落带水位变化及水位涨落后土壤理化性质变化对消落带土壤种子库的影响等方面进行研究。

1 消落带土壤水分的变化对适生植物生理生态影响

常年周期性水位变化, 使消落带土壤的含水量也呈现出由于旱到全淹的梯度变化特征。这种土壤水分的

梯度变化, 不但影响到消落带现有植物的生理生态学特性和生长发育, 也对消落带生态修复植物的选择提出了更高的要求。

许多学者对消落带植物的空间分布、群落结构及生物学特性开展了大量的调查分析和试验研究。如王勇等^[10]对三峡库区消落带植物群落数量的调查分析认为, 土壤湿度和淹水时间是消落带植物群落结构和空间分布的主要限制因子; 刘云峰等^[11]通过对三峡库区特有种疏花水柏枝的群落结构和生物学特性的研究指出三峡工程将导致该物种原自然居群的灭绝。

筛选出更多适合消落带水淹环境的植物种类对于消落带植被恢复和生态重建具有重要意义。大量研究表明, 南川柳、秋华柳、狗牙根、芦苇、水蓼等对水淹环境具有较强的耐受能力, 是适合消落带植被恢复与重建的先锋物种。李昌晓等^[12]模拟三峡库区消落带土壤水分的变化, 对落羽杉和池杉当年实生幼苗的光合特性和生理生态适应机制进行了比较研究, 表明池杉树种的耐旱与耐水湿特性优于落羽杉。秋华柳广泛分布于三峡库区河谷与溪流坡岸, 对水土保持及稳固堤岸具有重要作用。陈芳清等^[13]通过模拟水淹试验, 研究表明秋华柳幼苗对水淹的适应能力较强, 可作为库区水位消落带植被恢复与重建的先锋物种。此外, 谭淑瑞等对比研究了三峡库区自然消落带和非消落带的狗牙根, 分析其经过不同深度的水淹处理后抗氧化酶活性和碳水化合物含量的变化情况, 从深淹胁迫的生理响应上, 证明了狗牙根是三峡库区消落带植被恢复的优良树种。之后, 李强等^[14]的研究也证明了低位狗牙根对库区水位变化具有较强的适应能力。2004~2007 年, 重庆市园林绿化科研所在重庆主城嘉陵江石门段消落带进行耐水淹试验, 筛选出适宜消落带不同高程生态绿化的南川柳、枫杨、小栎木等 12 种植物。

第一作者简介:艾丽蛟(1972-), 女, 贵州六枝人, 在读博士, 现主要从事环境生态学研究工作。E-mail: alj101461@163.com.

收稿日期:2012-07-10

植物的耐淹性是其作为消落带植被恢复植物的重要条件。从已有适合消落带植物的研究来看,目前筛选出来适合消落带干湿交替特殊环境的植物种类仍较少,需通过进一步的研究开发出更多适合消落带的植物种类。在消落带水位周期性变化形成的特殊土壤环境条件下,这些植物能否耐受长时间的水淹还需要长期群落演替的检验。大部分研究是通过室内模拟三峡库区消落带土壤淹水变化特征进行植物淹水试验,而植物对消落带土壤环境的耐淹机制需要进行实地研究和检验。

2 消落带土壤重金属的分布特征与污染预警机制研究

三峡库区蓄水后,水体中各种重金属污染物将通过吸附、沉淀等形式迁移至消落带土壤中而引起土壤环境的改变。消落带土壤中的重金属含量直接关系到库区生态环境安全,严重影响库区的合理开发利用。因此,开展消落带土壤质量调查与评价,对土壤重金属污染物及其吸附与解吸行为进行试验研究,对开发消落带土壤污染的治理方法和技术具有重要意义。

对于消落带土壤重金属元素含量的分析研究,陈梓云等^[15]认为土壤的污染程度是消落带土地资源能否利用的关键,他们调查了三峡库区长江干流及小江支流消落带土壤中的铬、镉、铅等重金属污染状况,结果表明消落带土壤还未被这3种重金属污染。叶琛等^[16]对三峡库区消落带68个土样的重金属污染的研究表明,整个研究区不受Cr污染,70%以上土样不受Pb、Cu和Zn污染,As污染最严重,其次是Cd和Hg。还有研究发现库区消落带土壤重金属潜在生态风险处于轻微状态,主要生态风险元素为Cd。对于消落带土壤在水淹条件下的污染物释放量的研究,有学者指出三峡库区消落带被淹耕地的污染物释放总量将达到181 540.9 t,主要为COD_{Cr}和BOD₅;消落带土壤中Zn、Cu、Pb、Cr、Cd、Hg、As的含量都有所降低,而有效态的Zn、Cu、Pb、Cd、Te和Mn的含量多呈增加趋势^[17]。

关于三峡水库消落带土壤-水体系统中重金属元素的分布特征、影响因素及迁移规律的研究,袁廷权等^[18]通过对小江流域消落带土壤重金属分布特征和评价分析得出,重金属Cr、Cu、Zn、Pb、Cd、Ni含量均值均未超过国家土壤环境质量标准。另外,王晓阳等研究认为土壤重金属在消落带中的含量受土壤理化性质的影响,有机质对重金属含量有重要影响,pH值和机械组成也通过有机质多少来影响土壤重金属的含量。并对消落带不同海拔高程上的土壤重金属的分布进行了研究,发现Cu、Zn、Cr、Ni在消落带不同区段的分布总体呈从上游到中下游逐渐增大,下游又有所下降的趋势,在消落带不同高程上分布的差异性不显著。傅杨武等^[19]发现万

州苎溪河消落带内Zn的污染比较突出,其它3种重金属均处于安全级;苎溪河两岸消落带土壤均达到国家土壤环境质量二级标准,市区内沿河两岸消落带土壤受轻度污染。他们还对重金属在土壤-水体系统中的迁移规律和pH值变化对重金属迁移规律的影响进行了模拟研究。研究表明,在淹水期,长江水体一旦受到重金属元素Zn、Cu、Pb、Cr的污染,土壤中除Cr质量比可能降低外,Zn、Cu和Pb的质量比会明显增加,Zn迁移至各层土壤中,Pb和Cu滞留在土壤表层,造成土壤污染。随着江水污染程度的增加,土壤中重金属的质量比均有不同程度的升高。在水流相对静止的长江支流流域,重金属污染物不可避免地在消落带土壤中沉积、迁移。但pH值、氧化还原电位等水体环境发生改变,土壤中的重金属污染物可能重新进入长江水体。

对于铅、镉等重金属在消落带土壤中的吸附-解吸特性的研究,方卢秋^[20]通过模拟发现pH、有机质、离子强度和铅离子(Pb²⁺)浓度不同程度地影响三峡库区消落带Pb²⁺土壤吸附量和解吸量。影响土壤吸附量的顺序是:离子强度>pH>有机质>Pb²⁺浓度;影响土壤解吸量的顺序是:pH<Pb²⁺浓度<离子强度<有机质。可以推测三峡库区蓄水后,工、农业污染将导致土壤物理、化学、生物学和矿物学性质的变化,最终影响重金属元素在土壤中的吸附与解吸行为及其迁移和转化。

有关消落带土壤中重金属的研究一方面侧重于对重金属含量的调查与来源研究,另一方面通过土壤中重金属空间分布特征及模拟研究来分析重金属迁移转化规律。已有对于消落带土壤重金属的来源、形态特征和重金属在土壤中的吸附-解吸特性的研究还鲜有报道,实际淹水前后消落带土壤重金属的变化情况、GIS技术针对不同消落带土壤重金属污染的研究以及不同海拔高程上重金属形态的空间分布特征的研究还有待进一步深入。

3 消落带土壤对氮、磷等元素的吸附与释放特征

由于三峡库区消落带环境独特,其受强烈的人类干扰造成的水体富营养化的威胁是不可避免的。氮、磷是富营养化的主要限制因子,了解消落带土壤中氮、磷等营养物释放的影响因子及规律,对水体富营养状况的研究和控制是非常重要的。

对消落带土壤氮、磷元素的分布特征的研究发现,不同消落带坡地类型对土壤磷素形态及含量变化有很大关系。如张雷等^[21]研究发现不同坡地类型磷素分布差异明显,土+石质型坡地磷素形态变幅较大,有效性高的Ca₂-P、Al-P、Ca₈-P及易活性的Fe-P易在土体中累积,加强了对水体富营养化的威胁;切陡/缓坡裸岩型坡

地中的有效磷和水溶性磷含量均较低,变化幅度较小;稳定滩涂淤泥型坡地有效磷含量有上升趋势。利用分级浸取分离法首次对三峡入库河流大宁河回水区表层浸没土壤、消落带土壤不同形态氮含量进行了测定,发现与长江中下游浅水湖泊表层浸没土壤总氮含量相比,大宁河回水区表层浸没土壤总氮含量处于偏低水平;土壤样品释放动力学特征与总氮、总磷呈现较好的相关性,与有机质、样品氧化物组成、颗粒组成理化指标相关性较弱;样品中氨氮的释放量主要受其可转化态氮含量控制;消落带土壤中不同形态氮的来源可能相同。一些学者^[22-24]对三峡库区消落带土壤磷吸附特征开展的模拟研究发现,土壤淹水后紫色土和冲积土释放磷的风险大于黄壤土。土壤磷吸附能力和土壤活性铁、铝与有机质含量呈正相关,而与磷吸持饱和度呈负相关。

在周期性“淹水-落干”干湿交替环境对土壤磷释放的影响因子及消落带土壤磷释放规律的研究方面,马利民等^[25]研究发现在“淹水-落干”的周期性干湿交替条件下消落带土壤环境中不同形态磷释放的活性顺序为 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 Fe-P > $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 Al-P > O-P > $\text{Ca}_{10}\text{-P}$; T-P 在每次淹没时释放量递增;在持续淹水状态下磷释放的主要动力为 $\text{Ca}_2\text{-P}$,在水相的溶解和还原状态下主要为 Fe-P 的释放,其中 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 活性最高,而干湿交替条件下磷的释放主要是 Fe-P 在氧化-还原条件变换下的形态转换;淹水可以激活 O-P ,但不会使 O-P 释放;每次淹水时土壤的有效磷水平都有所增加,而每次落干较上次落干有效磷水平有所降低。三峡库区消落带土壤淹水-落干后对氮、磷等元素的吸附能力增强,且吸附的越多,释放的就越多。袁辉等^[26]以开县消落带典型区土壤作为测试土壤,研究发现三峡库区消落带土壤淹水-落干后吸磷能力增强,解吸率降低;土壤吸附一定磷后,再淹水磷会再次逐渐释放到上覆水当中,且土壤吸附外源磷越多,磷淹水释放强度越大;淹水-落干使吸附一定外源性磷的土壤淹水条件下释放更多的磷。另外,对消落带土壤氨氮等吸附特性的研究证明:三峡水库消落带土壤经淹水-落干后氨氮吸附能力增强;模拟淹水条件下,土壤吸附的氨氮越多,释放的总氮量亦越多;消落带土壤落干期吸纳大量来自农田地表径流的氮素,再淹水向水体中释放大量的氮素,会增加三峡水库发生富营养化污染的风险。

影响土壤磷释放的主要环境因素有温度、光照强度、溶解氧等。温度通过影响磷酸盐溶解度以及土壤微生物的矿化过程和同化作用2个方面影响磷的释放^[27]。光照强度刺激土壤中微生物的生长,生物体通过吸收磷进行同化作用进而影响水体中磷的含量。过去对于温度和光照对土壤磷释放的研究,大多是单一影响因素的研究,而关于2种因素对土壤磷释放的影响研究却很

少。于航等^[28]考察3种土壤即沉积物、水稻土和紫色土的释磷量在不同光照和温度下的变化规律。结果表明,光照强度促进土壤微生物将土壤中的有机态磷转化为无机态磷,进而促进土壤中内源磷的释放;温度对土壤磷释放的影响主要表现为受温度影响生长的微生物吸收土壤释放的磷,阻挡其进入上覆水中;同一温度和光照强度条件下土壤中磷释放量的顺序为:紫色土 > 水稻土 > 沉积物。

由于三峡库区水位的周期性梯度变化,消落带土壤会向水体中释放氮、磷等营养物质,使库区水体富营养化的风险大为增加。从已有研究看,对三峡水库消落带土壤磷素的吸附特征及释放规律方面的研究较多,但对消落带土壤氮素等其它元素的吸附及释放研究较少;对不同消落带土壤类型的氮磷释放规律、综合各种环境因素探讨土壤磷释放等方面的研究还需加强。

4 消落带受水位涨落后土壤理化性质的变化

消落带常年水位的周期性变化,会影响土壤理化性质、土壤肥力等土壤特性的变化。国内众多学者和有关部门自三峡水库建设初期就对消落带受水位涨落后土壤理化性质的变化开展了模拟研究。

康义等^[29]通过对三峡库区消落带土壤物理性质2a的定位监测和分析研究发现,由于水位涨落的周期性影响,消落带土壤的物理性质发生了很大变化:土壤密度增加,而土壤总孔隙度、毛管孔隙度和非毛管孔隙度均有所减少,且土壤最大持水量、毛管持水量和田间持水量降低,这种影响随着消落带水位涨落周年的增加而加剧。王晓荣等^[30]对三峡库区消落带回水区2种主要植被类型土壤养分特征的研究表明,除有效磷外,次生灌丛土壤养分含量均高于弃耕地,且其它养分指标变异系数在50%左右,而有效磷的变异系数达到91%。随海拔的升高,土壤养分未表现出明显差异性。消落带内全磷、全钾、有效磷、速效钾含量增加,表明水淹和清库等人为活动对土壤母质风化影响严重,导致消落带内土壤磷和钾含量增高,而速效钾在水淹后则大量流失;随着土壤层次的加深,除了有效磷外,其他养分都表现出逐渐降低的趋势。

三峡水库蓄水后反复的淹水-落干-淹水的过程,不但会对土壤的物理性质和化学特性产生影响,而且对消落带土壤性质的影响具有长期性。同时,还会导致土壤养分一定程度的下降和流失。常超等^[31]通过对石宝寨消落带12个水位96个点的土壤分析证实了这一点,且发现不同淹水强度的土壤容重、有机质、全氮、速效钾含量差异极显著,氨态氮含量差异显著,淹水土壤pH值高于未淹水土壤,有机质、全氮及速效钾含量低于未淹水土壤;长期淹水后(146 m)的土壤出现有机质及全量养

分累积现象。土壤抗蚀性是土壤理化性质密切相关的评定土壤抵抗侵蚀能力和治理水土流失必须具备的重要参数之一,是指土壤抵抗水的分散和悬浮的能力,其强弱取决于土粒间的胶结力及土粒与水的亲和力。徐泉斌等^[32]通过对三峡库区消落带不同地段、不同高程(145~175 m)取的 28 个土样进行土壤理化性质分析,对其土壤抗蚀性进行的研究发现,三峡库区的土壤有机质含量较低(平均 15.88 g/kg),其胶结物质主要是无机黏粒 <0.001 mm,与抗蚀性综合指数相关系数为 0.629。这说明消落带无机黏粒 <0.001 mm 的含量对土壤抗蚀性能影响较大。

已有的研究表明,由于库水浸泡和水浪冲击的时间长短不同,消落带不同高程、不同类型的土壤理化性质的变化程度也有较大差别。目前,对于受水位周期性涨落影响的三峡库区消落带土壤理化性质变化的研究还很少,且由于消落带反复的淹水-落干-淹水过程对消落带土壤性质影响的长期性,今后有必要分消落带类型加强土壤理化性状变化的模拟研究和长期动态监测。

5 水位变化对消落带土壤种子库的影响

土壤种子库是指存在于土壤上层凋落物和土壤中的全部存活种子。其在生态修复、植被演替及生物多样性保护等方面具有十分重要的作用。国内外学者就消落带种子库在植被发展的应用^[29]、水文变化对种子库的影响^[34]、入侵植物对种子库的特征变化^[35]等方面进行了大量的研究。

消落带水位变动频率、波动强度和持续时间是影响种子库的主要因素,土壤种子库数量、分布格局和种子萌发等都受到水位变动的影响。王晓荣等^[36]对三峡水库水淹初期消落带土壤种子库的数量、组成和分布的研究表明,水位变动、淹水时间的长短不利于种子存活,淹水降低了土壤种子库中的种子存量。另外,他们将三峡库区消落带回水区次生灌丛和弃耕地分成水淹区段、未水淹区段和对照样带,对其土壤种子库研究发现,未淹水区域种子密度最高,而水淹区域的种子密度最低,水位波动不利于种子库的建立。随着土层加深,种子库密度逐渐下降。水淹会使灌木植物种子所占土壤种子库的比例降低,草本植物种子的比例明显增加。另外,消落带土壤种子库的生物多样性指数、丰富度指数和均匀度指数与地表植被的变化相一致,但幅度较小,说明土壤种子库对干扰的响应比地上植被变化具有迟滞性。陈忠礼等^[37]的研究证实了这一结论,他们对三峡水库腹地的澎溪河支流白夹溪消落带的研究发现,水淹程度越严重,种子萌发物种数量及密度越小。水位变动对消落带湿地种子库分布格局产生影响,水位波动强度和持续时间是影响种子库的主要因素,在植被恢复与重建中应

该重视。

消落带土壤中可能存在大规模的种子库,其能否形成稳定的植物群落,与人为、水位的干扰程度和微地形等有很大关系,因此还有待于进一步的长期动态研究。在未来的研究中,可以从土壤种子库与植被之间的关系、种子库季节、年际变化、结实数量等方面,结合水文变化规律等环境参数建立植物生长模型,预测消落带植物群落的动态变化。此外,关于土壤种子库的组成、动态及其在植被恢复和演替中的作用等方面的研究还需进一步深入。

6 展望

截止目前,关于三峡水库消落带土壤环境的研究仍处于起步阶段,对于消落带水淹环境下适生植物的生理生化机制、重金属元素的分布特征与迁移规律、土壤中氮、磷等元素的吸附-释放特性等的研究都有待进一步深入。针对国内消落带土壤环境的研究概况,提出如下建议:

在研究方向上,多从景观和流域大尺度上开展消落带土壤环境的动态研究和监测,分析干湿交替特殊环境条件下消落带土壤环境的动态变化。

在研究内容上,从已有的文献来看,关于水位涨落后消落带土壤理化性质的变化及消落带土壤种子库方面的研究甚少,未来应加强这些方面的研究。如开展土壤物理性质变化的模拟和长期动态监测,同时对消落带受水淹后土壤种子库的季节变化、年际变化趋势、土壤种子库的组成及其在植被恢复和演替中的作用等方面进行长期动态研究。

在研究方法上,综合多学科多领域的研究方法,运用 3 S 技术、计算机模拟等数字化手段,对消落带土壤环境进行实时监控,并结合野外观察、采样及室内模拟研究,运用模型来建立适当的评价指标和体系,以期构建消落带生态环境风险评估与预警技术平台。

不同地区、不同流域消落带土壤环境的差异性较大,在对消落带土壤环境进行研究的过程中,需因地制宜,在借鉴国内外的研究理论和经验的同时,针对自身的特点和实际情况进行试验研究。

参考文献

- [1] Lowrance R R, Airier L S, Williams R G, et al. The riparian ecosystem management model: simulator for ecological processes in riparian zones [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2000, 55(1): 27-34.
- [2] Battaglia L L, Collins B S. Linking hydroperiod and vegetation response in Carolina bay wetlands [J]. Plant Ecology, 2006, 184(1): 173-185.
- [3] Kellogg C H, Bridgman S D, Leicht S A. Effects of water level, shade and time on germination and growth of freshwater marsh plants along a simulated succession gradient [J]. Journal of Ecology, 2003, 91(2): 274-282.
- [4] Azza N, Denny P, Koppel J V, et al. Floating mats: their occurrence and influence on shoreline distribution of emergent vegetation [J]. Freshwater

- Biology, 2006, 51: 1286-1297.
- [5] Venkatachalam A, Jay R, Eiji Y. Impact of riparian buffer zones on water quality and associated management considerations[J]. Ecological Engineering, 2005, 24(5): 517-523.
- [6] Futoshi N, Hiroyuki Y. Effects of pasture development on the ecological functions of riparian forests in Hokkaido in northern Japan[J]. Ecological Engineering, 2005, 24: 539-550.
- [7] 王炯. 三峡库区消落地的利用与管理问题研究[J]. 西南农业大学学报(社会科学版), 2003, 1(1): 35-38.
- [8] 王勇, 刘义飞, 刘松柏, 等. 三峡库区消涨带植被重建[J]. 植物学通报, 2005, 22(5): 513-522.
- [9] McDowell R W, Sharpley A N. Phosphorus solubility and release kinetics as a function of soil test P concentration[J]. Geoderma, 2003, 112: 143-154.
- [10] 王勇, 吴金清, 黄宏文, 等. 三峡库区消涨带植物群落的数量分析[J]. 武汉植物学研究, 2004, 22(4): 307-314.
- [11] 刘云峰, 母华成. 三峡库区平西坝疏花水柏枝(*Myricaria laxiflora*)研究初探[J]. 重庆三峡学院学报, 2005, 3(21): 4-7.
- [12] 李昌晓, 钟章成, 刘芸. 模拟三峡库区消落带土壤水分变化对落羽杉幼苗光合特性的影响[J]. 生态学报, 2005, 25(8): 1953-1959.
- [13] 陈芳清, 郭成圆, 王传华, 等. 水淹对秋华柳幼苗生理生态特征的影响[J]. 应用生态学报, 2008, 19(6): 1229-1232.
- [14] 李强, 丁武泉, 朱启红, 等. 水位变化对三峡库区低位狗牙根种群的影响[J]. 生态环境学报, 2011, 19(3): 652-656.
- [15] 陈梓云, 彭梦侠. 三峡库区消落带土壤中重金属铬调查与分析[J]. 四川环境, 2001, 20(1): 53-54.
- [16] 叶琛, 李思悦, 张全发. 三峡库区消落带表层土壤重金属污染评价及源解析[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(1): 146-149.
- [17] 杨钢. 三峡库区受淹土壤污染物释放量的试验研究[J]. 水土保持学报, 2004, 18(1): 111-115.
- [18] 裴廷权, 王里奥, 包亮, 等. 三峡库区小江流域土壤重金属的分布特征与评价分析[J]. 土壤通报, 2010, 41(1): 206-211.
- [19] 傅杨武, 祁俊生, 陈书鸿, 等. 三峡库区苈溪河流域消落带土壤重金属污染调查及评价[J]. 土壤通报, 2009, 40(1): 162-166.
- [20] 方卢秋. 铅在三峡库区消落带土壤中的吸附-解吸特性[J]. 重庆师范大学学报(自然科学版), 2010, 27(3): 27-31.
- [21] 张雷, 秦延文, 郑丙辉, 等. 三峡入库河流大宁河回水区沉积物和消落带土壤磷形态及其分布特征研究, 环境科学. 2009, 30(10): 2884-2890.
- [22] 马志敏, 傅瓦利, 胡宁, 等. 三峡库区消落带土壤无机磷组分的变化及其对有效磷的影响[J]. 水土保持学报, 2009, 23(3): 107-111.
- [23] 徐德星, 秦延文, 张雷, 等. 三峡入库河流大宁河回水区沉积物和消落带土壤磷形态及其分布特征研究[J]. 环境科学, 2009, 30(5): 1337-1344.
- [24] 王改改, 傅瓦利, 魏朝富, 等. 消落带土壤铁的形态变化及其对有效磷的影响[J]. 土壤通报, 2008, 39(1): 66-70.
- [25] 马利民, 张明, 滕衍行, 等. 三峡库区消落带周期性干湿交替环境对土壤磷释放的影响[J]. 环境科学, 2008, 29(4): 1035-1039.
- [26] 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.
- [27] 潘成荣, 张之源, 叶琳琳, 等. 环境条件变化对瓦埠湖沉积物磷释放的影响[J]. 水土保持学报, 2006, 20(6): 148-152.
- [28] 于航, 张蕾, 王刚, 等. 光照强度和温度对三峡水库消落带典型土壤磷释放的影响[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(19): 11539-11541.
- [29] 康义, 郭泉水, 程瑞梅, 等. 三峡库区消落带土壤物理性质变化[J]. 林业科学, 2010, 46(6): 1-5.
- [30] 王晓荣, 程瑞梅, 肖文发, 等. 三峡库区消落带初期土壤养分特征[J]. 生态学杂志, 2010, 29(2): 281-289.
- [31] 常超, 谢宗强, 熊高明, 等. 三峡水库蓄水对消落带土壤理化性质的影响[J]. 自然资源学报, 2011, 26(7): 1236-1242.
- [32] 徐泉斌, 傅瓦利, 孙璐, 等. 三峡库区消落带土壤抗蚀性研究[J]. 水土保持研究, 2009, 16(5): 13-18.
- [33] Liu W Z, Zhang Q F, Liu G H. Seed banks of a river-reservoir wetland system and their implications for vegetation development[J]. Aquatic Botany, 2009, 90: 7-12.
- [34] Cap son S J, Brock M A. Flooding, soil seed bank dynamics and vegetation resilience of a hydrologically variable desert flood plain[J]. Freshwater Biology, 2006, 51: 206-223.
- [35] Vosse S, Esler K J, Richardson D M, et al. Can riparian seed banks initiate restoration after alien plant invasion? Evidence from the Western Cape, South Africa[J]. South African Journal of Botany, 2008, 74: 432-444.
- [36] 王晓荣, 程瑞梅, 封晓辉, 等. 三峡库区消落带回水区水淹初期土壤种子库特征[J]. 应用生态学报, 2009, 20(12): 2891-2897.
- [37] 陈忠礼, 刘红, 孙荣, 等. 三峡库区澎溪河消落带湿地土壤种子库特征[J]. 重庆师范大学学报(自然科学版), 2011(3): 33-35.

Research Progress on Soil Environment in Water-Level-Fluctuation Zone

AI Li-jiao^{1,2}, WU Zhi-neng², ZHANG Yin-long¹

(1. College of Forest Resources and Environment, Nanjing Forestry University, Nanjing, Jiangsu 210037; 2. Chongqing Institute of Landscape Gardening, Chongqing 401329)

Abstract: The foreign and domestic research of the water-level-fluctuation zone soil environment from the five aspects were summarized. Including the physiological and biochemical effects on suitable plants caused by fluctuating soil moisture, heavy metal dynamic distribution and pollution warning mechanism research, nitrogen and phosphorus adsorption and release characteristics, the change of soil physical and chemical properties after water level fluctuations, and the influences of water level changes on soil seed bank. Finally, some suggestions were put forward.

Key words: water-level-fluctuating zone; soil environment; ecological early warning; ecological security