边坡生态防护工程生境基材的磷素吸附—解吸特征

夏振尧[1,2]，牛鹏辉[1,2]，梁永哲[1]，薛海龙[3]，吴 彬[4]，许文年[1,2]

(1. 三峡地区地质灾害与生态环境湖北省协同创新中心，湖北 宜昌 443002；2. 三峡大学 土木与建筑学院，湖北 宜昌 443002；3. 三峡大学 生物与制药学院，湖北 宜昌 443002；4. 东北林业大学 生态研究中心，黑龙江 哈尔滨 150040)

摘 要：[目的] 明确边坡生态防护工程生境基材的磷素保持能力，为优化基材配方提供依据。[方法] 以向家坝水电站边坡生态防护工程生境基材为对象，采用恒温振荡培养法进行吸附和解吸试验，比较不同基材的磷素吸附和解吸能力，并用因子分析法比较基材磷素的流失风险。[结果] 最大吸附量(Q_m)、最大缓冲容量(MBC)和磷吸持指数(PSI)3 个指标均显示，5 种基材的固磷能力为：天然次生林＞客土喷播＞厚层基材＞框格梁覆土＞植被混凝土，Q_m 与基材的黏粒含量显著正相关，与有机质含量和 pH 值显著负相关；磷的解吸能力为：植被混凝土＞框格梁覆土＞客土喷播＞厚层基材＞天然次生林，平均解吸率与 pH 值极显著正相关，与有机质含量显著正相关，与黏粒含量显著负相关；因子分析表明 Q_m，MBC，PSI、平均解吸率和易解吸磷 5 个指标可以表示边坡磷素的流失风险。边坡磷素流失风险的大小为：植被混凝土＞框格梁覆土＞客土喷播＞厚层基材＞天然次生林。[结论] 5 种生态防护方式中，天然次生林对磷的保持能力最好，植被混凝土基材对磷的保持能力最差；在施工中应当增大基材中黏粒的比重，并适当减少水泥用量或加入缓冲物质，以使基材能够具有较强的磷吸附能力、较大的磷库容和较小的磷流失风险，从而提高磷素的利用率并使其具有持久的供磷能力。

关键词：边坡；生态防护工程；磷素；吸附；解吸

文献标识码：A **文章编号**：1000-288X(2016)03-0346-07 **中图分类号**：S153

文献参数：夏振尧，牛鹏辉，梁永哲，等. 边坡生态防护工程生境基材的磷素吸附—解吸特征[J]. 水土保持通报，2016，36(3)：346-352. DOI：10. 13961/j. cnki. stbctb. 2016. 03. 059

Absorption and Desorption Characteristics of Phosphorus in Substrates Used in Slope Ecological Rehabilitation Engineering

XIA Zhenyao[1,2], NIU Penghui[1,2], LIANG Yongzhe[1], XUE Hailong[3], WU Bin[4], XU Wennian[1,2]

(1. *Collaborative Innovation Center for Geo-hazards and Eco-environment in Three Gorges Area, Hubei Province, Yichang, Hubei* 443002, *China*; 2. *College of Civil Engineering and Architecture, China Three Gorges University, Yichang, Hubei* 443002, *China*; 3. *College of Biotechnology and Pharmaceutical, China Three Gorges University, Yichang, Hubei* 443002, *China*; 4. *Center for Ecological Research, Northeast Forestry University, Harbin, Heilongjiang* 150040, *China*)

Abstract: [Objective] To determine the utilization of phosphorus in slope ecological rehabilitation substrate in order to provide theoretical basis for optimizing substrate formulation. [Methods] Adsorption-desorption characteristics of phosphorus in five types of slope ecological rehabilitation substrates were studied via constant temperature shaking culture. Then, the adsorption-desorption capacity and loss risk of the five substrates were compared with factor analysis. [Results] The maximum adsorption capacity(Q_m), maximum buffering capacity(MBC) and phosphorus sorption index(PSI) have shown that the phosphorus fixation capacity of the five substrates was in an order of the natural secondary forest＞the external-soil spray seeding＞the thick layer substrate＞the framed beams soil covering＞the vegetation-compatible concrete. It showed that Q_m had positive correlation with clay content, while it had negative correlation with organic matter content and pH value. The desorption ability of the five types of substrates was the vegetation-compatible con-

收稿日期：2015-03-19 **修回日期**：2015-07-08

资助项目："十二五"国家科技支撑计划项目"金沙江梯级水电开发区生态保护与入库泥沙调控关键技术与示范"(2012BAC06B02)；三峡库区生态环境教育部工程研究中心开放基金(KF2013-10)

第一作者：夏振尧(1981—)，男(汉族)，湖北省宜昌市人，博士，副教授，主要从事边坡防护与生态恢复研究工作。E-mail：xzy_yc@ctgu. edu. cn。

通讯作者：许文年(1960—)，男(汉族)，河北省元氏县人，博士，教授，博士生导师，主要从事边坡防护与生态恢复术研究。E-mail：xwn@ctgu. edu. cn。

crete＞the framed beams soil covering＞thick layer substrate＞the external-soil spray seeding＞the natural secondary forest. The average desorption rate had significantly positive correlation, and it also had positive correlation with organic matter content. The negative correlation was found between the average desorption rate and clay content. This study showed that Q_m, MBC, PSI, the average desorption rate and easy desorption phosphorus(RDP) could best reflect the phosphorus loss risk of five different substrates. It showed that from high to low, the order of the phosphorus loss risk was the vegetation-compatible concrete, the framed beams soil covering, the external-soil spray seeding, thick layer substrate and the natural secondary forest. [Conclusion] The natural secondary forest has the highest conservation capacity of phosphorus in the five ecological rehabilitation engineering ways, while the vegetation-compatible concrete has the lowest. In slope ecological rehabilitation engineering, the proportion of clay content should be increased and the dosage of cement should be decreased, or buffering material be added into substrate, so that the substrate can have a stronger phosphorus adsorption capacity, the larger phosphorus storage, the smaller phosphorus loss risk. Thus, the utilization ratio of phosphorus can be improved and the supplying ability can last longer.

Keywords: slope; ecological rehabilitation engineering; phosphorus; adsorption; desorption

在水电工程建设中,开挖、回填等工程扰动导致边坡生态系统退化,水土流失。目前,单独使用植物或者植物与土木工程和非生命的植物材料相结合的边坡生态防护工程,是扰动边坡生态恢复和水土保持的常用措施。边坡生态防护工程在实施时,通常利用土木工程手段在扰动坡面附着一层基材,以利于植物生长和发育,而基材的肥力持续性往往是边坡生态防护工程后期植被生长和演替的重要影响因素[1]。

基材中的磷是植物生长必须的大量元素之一,其含量与植物的生长关系密切。植物生长所吸收的磷直接来源于土壤溶液,而土壤溶液中的磷与基材颗粒表面的磷处于动态平衡状态,此平衡受到土壤固相对磷的吸附—解吸作用和植物对磷的吸收作用的影响[2-3]。一般认为,磷的固定和释放过程决定着土壤中有效磷的含量。目前定量研究土壤磷素吸附—解吸能力普遍采用 Barrow[4] 法,并主要应用于农业土壤。边坡生态防护工程生境基材由多种混合物组成(其中当地土壤质量比重占 90%以上),对此类基材磷素吸附—解吸特征的研究还未见报道。

本文以向家坝水电站边坡生态防护工程典型生境基材为对象,以天然次生林地土壤为对照,采用恒温振荡培养法研究基材的磷素吸附—解吸特征,揭示不同边坡生态防护工程基材的磷素吸附、解吸的差异,旨在提高磷素利用率、减少土壤磷素流失,并为边坡生态防护工程基材的优化提供理论依据。

1　研究区概况

向家坝水电站位于长江上游金沙江的向家坝河谷出口处,坝址左岸位于四川省宜宾县内。向家坝库区是典型的亚热带季风气候,库区内热量充足、降雨较为丰沛、四季分明、夏季温度高湿度大、冬季较为温暖、无霜期长,对亚热带林木、农作物的生长有利。最大年日照时数为 1 260.9 h,年平均气温 12.0～18.1 ℃,最大年降雨量 1 168.5 mm,年最小降雨量 852.4 mm。

向家坝水电站的建设产生了大量的扰动边坡,对这些边坡的治理采用了框格梁覆土技术、植被混凝土生态防护技术、厚层基材边坡绿化技术和客土喷播技术等边坡生态防护工程方法。其中框格梁覆土边坡生境基材为当地土壤;植被混凝土边坡生境基材为土壤、水泥、有机质、复合肥、混凝土绿化添加剂和保水剂的混合物;厚层基材为土壤、有机质、粘合剂、木纤维、复合肥及保水剂的混合物;客土喷播生境基材为土壤、有机质、粘合剂、复合肥及保水剂的混合物。目前这些扰动边坡生态防护工程已经取得良好的恢复效果。

2　材料与方法

2.1　取样方法

基材样品于 2012 年 6 月采集于向家坝水电站边坡生态防护工程的 4 种典型边坡。其中,框格梁覆土 2004 年施工,植被混凝土基材 2005 年施工,厚层基材 2005 年施工,客土喷播 2004 年施工,另取 1 种天然次生林地,作为对照样。5 种取样分别编号为 A,C,E,H,M。施工中的土壤均取自同一土料场。各边坡坡度 53°～68°[5]

依据所选取的单个边坡面积大小,土壤样品按“S”形多点取样,取样深度 0—10 cm,每个样点取 3 次,混匀,带回实验室风干,除去杂质,磨碎,过 100 目筛。将过筛后的土壤充分混合,四分法取出供试验分析的土样。

2.2　试验方法

(1) 基材各基本指标测定方法。pH 值用电位法

测定;有机质含量用重铬酸钾加热法测定;全磷用钼锑抗比色法测定;有效磷用 0.5 mol/L$NaHCO_3$ 浸提—钼锑抗比色法测定;土壤有机磷用 Bowman-Cole 法测定;黏粒含量用筛分称重法测定。

(2) 吸附试验。准确称量 2.00 g 土样 8 份于 100 ml 的塑料离心管中,分别加入含磷 0,4,8,16,24,32,40,60 mg/L 的 KH_2PO_4 标准溶液[6-7](以 pH=7.0 的 0.01 mol/LKCl 为溶剂)50 ml,滴加 3 滴甲苯抑制微生物活性。每个处理做 4 个重复。于 25 ℃,振速 200 r/min的恒温振荡器中振荡培养 24 h 后,4 000 r/min离心 15 min,取上清液,用钼蓝比色法测定上清液中的磷浓度,根据振荡前后溶液中磷浓度的差值,计算土壤对磷的吸附量。

(3) 解吸试验。倾去离心管中的上清液,向经过磷吸附的土壤中加入 30 ml 95%的乙醇,在振荡器上震荡 30 min,以洗去土壤颗粒表面的磷,离心后倒掉上清液,再重复洗涤 2 次。向各离心管中加入 pH 值为7.0的 0.01 mol/L 的 KCl 溶液 50 ml,继续恒温振荡培养 24 h 后测定上清液中的磷浓度,振荡和测定方法同吸附试验。上清液中磷的含量即为磷解吸量[8-9]。并计算磷的解吸率。

2.3 基材固磷参数

(1) 磷吸持指数 PSI。加入磷浓度为 60 mg/L 时,即在土液比为 1∶25 的条件下,每克土加1.5 mg 磷使二者充分混合,平衡后的土壤吸磷量 Q 与平衡溶液中磷浓度 C 的对数值之比为 PSI,即:

$$PSI=\frac{Q_{60}}{\lg C_{60}} \tag{1}$$

式中:Q_{60}——加入磷浓度为 60 mg/L 时,平衡后基材的磷吸附量(mg/100 g);C_{60}——平衡溶液中磷浓度(μmol/L)。PSI 可以表征土壤的固磷能力,该值越大,土壤对磷的吸持能力越大,反之则吸持能力越小,越易流失[8]。

(2) 磷零点吸持平衡浓度 EPC_0。基材溶液中的磷在达到吸附与解吸的动态平衡时的浓度,等温吸附曲线与 x 轴的截距即为基材的 EPC_0 值(mg/L)。EPC_0 可用来表征磷从基材固相进入溶液的风险大小[10]。

(3) 易解吸磷 RDP。当加入溶液中磷浓度为 0 时,达到平衡的吸附量,即 0.01 mol/L 的 KCl 提取的磷量(mg/kg)[7]。RDP 可以表征磷由固相进入液相的能力,越大磷越容易流失。

以上参数可根据试验直接得出,其他可用于表征基材对磷吸附能力的参数,需通过基材对磷的吸附方程来计算。目前常用 Langmuir, Freundlich 和 Tempkim 方程等经验方程来拟合土壤对磷的吸附过程。利用 Langmuir 方程及其等温吸附特征值,可以很好地表征土壤的供磷特性、磷流失风险及计算合理的指导施磷量,而 Freundlich 方程和 Tempkim 方程不能给出这些特征值,因此普遍采用 Langmuir 方程来研究磷素等温吸附特征[11]。本文用 Langmuir 方程来拟合基材对磷的吸附过程,并根据方程计算固磷参数。Langmuir 吸附模型:

$$\frac{C}{Q}=\frac{C}{Q_m}+\frac{1}{kQ_m} \tag{2}$$

式中:C——平衡液中磷的浓度(mg/L);Q——达到平衡时磷的吸附量(mg/kg);k——吸附常数;Q_m——磷的最大吸附量(mg/kg)。下同。

(4) 磷的最大吸附量 Q_m 和吸附常数 k。Q_m 是基材磷库容大小的标志,该值越大表明基材能吸附磷的位点越多。k 在一定程度上反映了土壤吸附磷的能级。k 为正值,说明吸附反应在常温下是自发进行的,而 k 值的大小,反映吸附的自发程度,k 值越大,反应的自发程度越强,生成物越稳定,其供磷强度则越弱[12]。根据(2) 式$\frac{C}{Q}$与 C 成直线关系,而$\frac{1}{Q_m}$是这条直线的斜率,即可算出 Q_m 值,将直线延长至与纵坐标相交,则可算出 k 值。

(5) 土壤最大缓冲容量 MBC。磷素吸附的强度与容量的综合参数,能较好地表征土壤的对磷的吸附能力。计算公式为(3):

$$MBC=kQ_m \tag{3}$$

该值越大,说明基材贮存磷的能力越强。如果基材的 Q_m 高而 MBC 低,则磷因与基材结合能力低而容易进入土壤溶液中并随水流失。只有 Q_m 高,MBC 也较高时,基材中的磷素才不易流失[13]。

(6) 磷吸持饱和度 DPS。基材有效磷水平和基材固磷能力的综合指标[14]。等于有效磷含量 Oslen-P 与最大吸附量的比值。计算公式为(4):

$$DPS=\frac{\text{Oslen-P}}{Q_m}\times 100\% \tag{4}$$

2.4 数据处理

采用 Excel 表格拟合 Langmuir 方程,并做等温吸附、解吸和解吸率曲线,用 SPSS 17.0 统计分析软件进行方差分析、多重比较和因子分析。

3 结果与分析

3.1 基材基本理化性质

基材的一些基本理化性质见表 1。4 种工程防护边坡基材的 pH 值显著或极显著高于天然次生林,其中以植被混凝土基材最高,这是因为向家坝地处西南酸雨严重地区,地表土壤一般呈酸性,边坡防护工程

所用土壤大多取自地下较深处,pH 值高于地表土壤,并且植被混凝土基材中加入了水泥,由此产生的 $Ca(OH)_2$ 提高了基材的 pH 值,这与周明涛等[15]的研究结果一致。框格梁覆土、植被混凝土基材和厚层基材的有基质含量均显著高于客土喷播和天然次生林,客土喷播和天然次生林差异不显著,这一结果与施工加入的材料、植物的种类、植被的演替状况及其凋落物等多种因素有关。植被混凝土基材的全磷和有效磷含量显著高于其他 4 种样地,一方面是因为施工时植被混凝土对磷肥的添加量较大,使其全磷和有效磷的含量较大,另一方面是因为施工用土取自地下较深处,肥力低于天然次生林的地表土,框格梁覆土、厚层基材和客土喷播对磷肥的添加不显著,因此磷含量低于植被混凝土而与天然次生林无显著差异。黏粒含量为:天然次生林>客土喷播>框格梁覆土>厚层基材>植被混凝土基材。

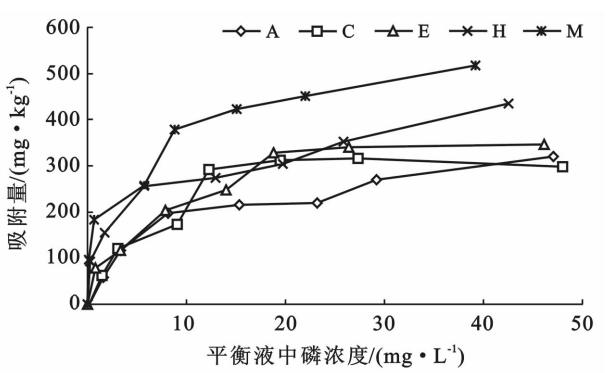
表 1　边坡生态防护工程生境基材的基本理化性质

边坡类型	pH 值	有机质/(g·kg^{-1})	全磷/(g·kg^{-1})	有效磷/(mg·kg^{-1})	黏粒/%
框格梁覆土(A)	6.98±0.14^{ABb}	15.64±1.24^{ABb}	1.33±0.21^{Bb}	78.13±20.92^{Bb}	33.76±1.22^{BCb}
植被混凝土(C)	7.80±0.50^{Aa}	19.76±2.51^{Aa}	3.18±1.35^{Aa}	299.61±74.04^{Aa}	25.68±1.28^{Dd}
厚层基材(E)	6.80±0.33^{Bb}	12.57±2.97^{BCb}	1.40±0.20^{Bb}	61.70±17.46^{Bb}	30.56±0.86^{Cc}
客土喷播(H)	6.75±0.27^{Bb}	8.41±1.23^{Cc}	1.73±0.10^{Bb}	69.05±3.13^{Bb}	34.14±1.87^{Bb}
天然次生林(M)	5.71±0.45^{Cc}	7.60±1.05^{Cc}	0.68±0.21^{Bb}	76.33±12.70^{Bb}	39.24±0.57^{Aa}

注:同列不同大写字母表示在 $p=0.01$ 水平上有显著性差异;不同小写字母表示在 $p=0.05$ 水平上有显著性差异。

3.2　基材磷素的吸附特征

3.2.1　*磷的等温吸附曲线*　图 1 为 5 种边坡生态防护工程生境基材对磷的等温吸附曲线。从图 1 能看出,不同生态防护工程基材对磷的吸附能力不同。在低浓度下,吸附速率高,基材对磷的结合能大,吸附的方式主要为化学吸附(土壤中的不定型铁、铝等)和黏粒上的盐基离子对磷的共价吸附。土壤对磷的吸附量随着平衡液浓度的增大而增大,在高浓度下,基材对磷的结合能小,以物理吸附为主[7]。当磷浓度达到一定值时,吸附量达到最大值。图 1 表明,天然次生林地土样对磷整个吸附过程中的吸附速率和吸附量均大于其他 4 种生境基材,这主要是由于基材之间的无定形铁、铝及黏粒上盐基离子对磷的共价吸附不同引起的[16]。



注:A 框格梁覆土;C 植被混凝土;E 厚层基材;H 客土喷播;M 天然次生林。下同。

图 1　边坡生态防护工程生境基材对磷的等温吸附

3.2.2　*基材的磷素吸附特性与基本固磷参数*　将 5 种基材对磷的吸附特征用 Langmuir 方程拟合,结果见表 2。拟合的相关性均达到了极显著水平(R^2 在 0.955 8～0.983 3),因此适合用来描述 5 种基材对磷的吸附特性。

表 2　Langmuir 方程对边坡生态工程磷的等温吸附拟合情况

边坡类型	Langmuir 方程	R^2
框格梁覆土	$y=0.002\ 8x+0.024\ 8$	0.964 9**
植被混凝土	$y=0.002\ 9x+0.025\ 0$	0.970 2**
厚层基材	$y=0.002\ 5x+0.015\ 3$	0.983 3**
客土喷播	$y=0.002\ 3x+0.010\ 6$	0.955 8**
天然次生林	$y=0.001\ 9x+0.005\ 7$	0.979 5**

注:* 表示显著相关($p<0.05$);** 表示极显著相关($p<0.01$)。下同。

表 3 是 5 种边坡生态防护工程生境基材的基本固磷参数。结果显示,Q_m,MBC 和 PSI 3 个指标大小顺序一致,表示固磷能力从大到小依次为:天然次生林>客土喷播>厚层基材>框格梁覆土>植被混凝土。磷零点吸持平衡浓度 EPC_0 表现为厚层基材最大,为 0.143 mg/L 植被混凝土最小,为 0.131 mg/L,均在一个极小的水平。易解吸磷 RDP 以植被混凝土和框格梁覆土较大,同为 1.642 mg/kg,其次是厚层基材和客土喷播,同为 1.148 mg/kg,植被混凝土最小,为0.654 mg/kg。磷吸持饱和度 DPS 是水土界面磷迁移的指标,该值越低磷吸持能力越强,反之越容

易流失。一般认为土壤DPS大于25%时,磷素容易流失[17]。DPS以植被混凝土最高(86.9%),远高于25%,因此流失风险极大,其次是框格梁覆土(21.9%),客土喷播和厚层基材较小(15.9%和15.4%),天然次生林最小(14.5%)。相关性分析(表4)表明,5种基材的最大吸磷量Q_m与基材黏粒含量成显著正相关,与pH和有基质含量呈显著负相关。这是由于基材中黏粒表面具有铝氧化物而带永久性负电荷,因此对磷的化学吸附强,再加上土壤黏粒的比表面积大、吸附位点多而对磷的物理吸附强等原因,导致土壤对磷的吸附能力与黏粒含量正相关。这与贾学萍[11]、刘霄等[9]的研究结果相似。植被混凝土基材中添加的水泥使基材pH值显著高于其他土壤,其对磷的吸附能力较其他生态防护工程弱。

几乎所有的研究表明,土壤对磷的最大吸附量Q_m与土壤黏粒含量呈显著正相关,而与pH值和有机质含量的相关性各有不同。曹志洪等[18]的研究表明,黄土性土壤的最大吸磷量与pH值和有机质含量无显著相关性。这是因为有机质能屏蔽吸附位并和磷产生竞争吸附,但同时又提供了H^+而有利于磷酸根离子的吸附,但在不同条件下或是因为土壤性质不同的原因,这2种作用所占比重不同,因此不同学者的研究结果有所不同。5种边坡生态防护工程生境基材对磷吸附行为的差异主要与基材性质有关。因为酸性基材中的铁、铝氧化物是基材磷素的主要吸附载体,而氢氧化铝和氢氧化铁凝胶对磷的吸附量随会pH值的升高而减小。另外,随着pH值的增加,基材颗粒表面的负电荷会增加,正电荷会减少,由于电荷的排斥作用,基材的吸磷量也会减小[6],这是本试验中Q_m与pH值呈显著负相关的原因。马良等[19]的研究也说明了这一点。而有机质降解产生的碳水化合物能掩蔽基材颗粒上的吸附位点。同时,有机质降解产生腐殖酸,腐殖酸能被基材颗粒有效的吸附,在一定程度上与磷形成竞争。另外,有机质与无机胶体形成有机—无机复合体的形式存在于基材中,该复合体可以和铁、铝络合,使Fe-P和Al-P得以释放。因此有机质含量与最大吸磷量Q_m呈显著负相关。这与Yuan[20]的研究结论一致。

根据以上5种边坡生态防护工程生境基材对磷的吸附特征,以Q_m,MBC和PSI 3个指标评判土壤的固磷能力,从大到小依次为:天然次生林>客土喷播>厚层基材>框格梁覆土>植被混凝土。

表3 边坡生态防护工程生境基材基本固磷参数

边坡类型	Q_m/(mg·kg^{-1})	k	MBC/(mg·kg^{-1})	DPS/%	PSI	EPC_0/(mg·L^{-1})	RDP/(mg·kg^{-1})
框格梁覆土	357.1	0.113	40.35	21.9	19.154	0.141	1.642
植被混凝土	344.8	0.116	40.00	86.9	17.676	0.131	1.642
厚层基材	400	0.163	65.2	15.4	20.808	0.143	1.148
客土喷播	434.8	0.217	94.35	15.9	26.705	0.137	1.148
天然次生林	526.3	0.333	175.26	14.5	32.424	0.134	0.654

注:Q_m为最大吸磷量;k为吸附常数;MBC为最大缓冲容量;DPS为磷吸持饱和度;PSI为磷吸持指数;EPC_0为磷零点吸持平衡浓度;RDP为易解吸磷。下同。

表4 Q_m与pH值、有机质、黏粒、平均解吸率的相关性

项 目	Q_m	pH值	有机质	土壤黏粒
pH值	−0.927*	1		
有机质	−0.889*	0.883*	1	
黏粒含量	0.832*	−0.924*	−0.836*	1
平均解吸率	−0.985**	0.966**	0.923*	−0.853*

3.3 基材磷素的解吸特征

3.3.1 *磷的等温解吸曲线* 图2为5种边坡生态防护工程生境基材的磷等温解吸曲线。可以看出,解吸量随吸附量的增大而增加,说明土壤和磷的结合能力随吸附量的增大而有所降低。这是由于低浓度时,吸附能大,磷被土壤专性固定而不能解吸出来,当磷含量高时,结合能小,磷容易解吸出来[21]。相比于吸附过程,磷的解吸没有明显的慢速和快速的阶段。吸附量相同时,磷的解吸量从大到小依次为:植被混凝土>框格梁覆土>厚层基材>客土喷播>天然次生林,与吸附的顺序相反。5种边坡生态防护工程基材对磷的等温解吸方程见表5,其等温解吸方程均符合指数方程(其中y为解吸量,x为吸附量),拟合的相关性均达到了显著水平。

3.3.2 *磷的解吸率曲线* 当加入磷浓度为0时,基材吸附量为负值,去除该点做磷的解吸率曲线(图3)。

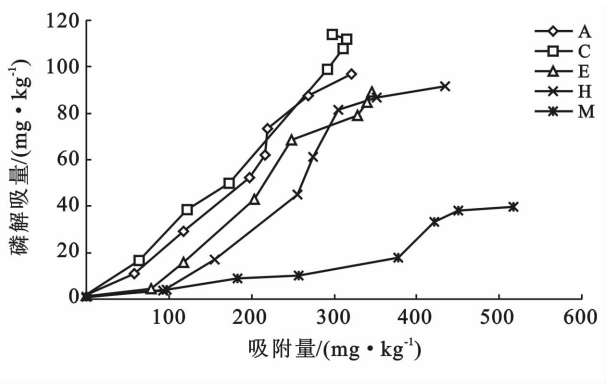


图 2　边坡生态防护工程基材的磷解吸曲线

表 5　边坡生态防护工程基材对磷的等温解吸方程

边坡类型	磷解吸曲线方程	R^2	平均解吸率/%
框格梁覆土	$y=9.335\ 8\ e^{0.008\ 3x}$	0.912 3**	27.9
植被混凝土	$y=13.415\ e^{0.006\ 9x}$	0.959 4**	32.7
厚层基材	$y=4.007\ 8\ e^{0.009\ 5x}$	0.873 0*	20.4
客土喷播	$y=1.872\ 5\ e^{0.011x}$	0.897 5*	18.2
天然次生林	$y=2.678\ 3\ e^{0.005\ 5x}$	0.957 6**	6.0

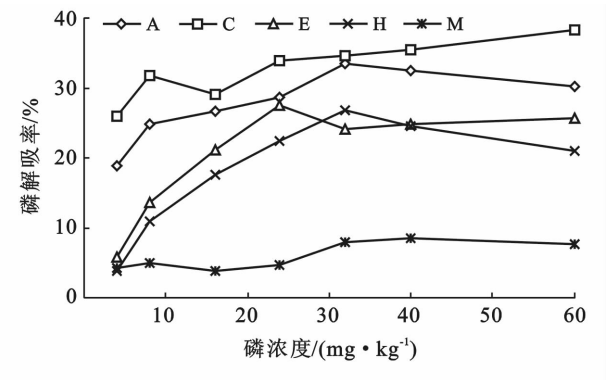


图 3　边坡生态工程基材磷的解吸率曲线

从图 3 可以看出,5 种基材的解吸率随着平衡溶液磷浓度的增加均有不同程度的增大。植被混凝土、框格梁覆土、天然次生林地的解吸率在平衡液浓度升高时小幅度增大,而厚层基材和客土喷播在浓度升高时有较大幅度的增加。由于基材对磷的吸附是多种吸附共同作用的结果,各种吸附间存在竞争作用。当加入低浓度的磷溶液时,磷优先被吸附能力较强的化学吸附作用固定,其结合牢固,解吸率低。当加入低浓度的磷溶液时,除了少部分被化学吸附固定,大部分被物理吸附作用固定,该吸附能力较弱,容易解吸,因此解吸率增大[13]。磷的平均解吸率可作为评价磷流失风险的一个指标[8],5 种基材磷的平均解吸率(表 5)。相关分析(表 4)表明,平均解吸率与 pH 值极显著正相关,与有机质显著正相关,与土黏粒含量显著负相关,其原因与 pH 值、有机质和黏粒含量对吸附作用的影响机制相同。另外,有机酸能活化基材中的磷,对磷酸钙盐和磷酸铁铝盐分别通过溶解作用和络合作用使其活化,这能使被固定的磷释放出来[22],因此在一定范围内,基材中的有机酸含量越高,基材释放的磷越多,即基材对磷的吸附固定能力与有机酸含量负相关,这也是平均解吸率与 pH 值显著正相关的一个原因。

3.4　磷的流失风险

一般情况下,土壤对磷吸附和解吸的多个指标并不一致,加上不同研究土样自身性质的差异,适用于一种土壤的判定指标并不一定适用于另一种土壤。因此对磷素流失风险的判断需要对这些指标进行分析,选取最适合的几个作为判断标准。对磷素流失风险的评判,不同学者的研究均有不同,但总体上都是从磷的固定和释放两方面分析,具有较大固磷能力和较小释磷能力的土壤具有较小的磷素流失风险。刘子国等[23]以土壤有效磷含量 56.0 mg/kg 作为武汉市郊区土壤磷素流失的临界值对磷素流失风险进行了评价。张国林等[24]采用因子分析方法对水田落干土样和蔬菜地土壤的基本性质和若干磷指标的变化量进行了分析,发现土壤磷进入径流的风险和数量首先取决于土壤的供磷能力。黄东风等[14]以 $CaCl_2$-P 为因变量,速效磷和全磷为自变量,对福州市郊菜地土壤样品的测定值进行线性回归分析,以求得的土壤发生磷素淋失的速效磷临界值和全磷临界值为判断标准,并结合流失的 DPS 阈值(25%)对福州市郊菜地土壤的磷素流失潜能进行了分析。高秀美等[25]以南京市郊集约化蔬菜地为研究对象,运用 Langmuir 方程获得表征土壤磷素缓冲性能的土壤磷的 MBC 和 DPS 对土壤磷素流失风险进行了评估。借鉴以上文献,本文利用因子分析法将 Q_m,MBC,DPS,PSI,EPC_0,RDP 和平均解吸率 7 个指标处理为 F_1 和 F_2 2 个因子,其旋转因子荷载矩阵见表 6。

表 6　土壤磷流失因子分析法旋转因子荷载矩阵

指 标	因子	
	F_1	F_2
Q_m	0.998	−0.060
PSI	0.985	−0.028
平均解吸率	−0.974	0.222
RDP	−0.966	0.149
MBC	0.965	0.250
EPC_0	−0.221	−0.969
DPS	−0.529	0.833
初始特征值	5.161	1.715
贡献率/%	73.732	24.501
累计贡献率/%	73.732	98.233

注:提取方法为主成分分析法;旋转方法为具有 Kaiser 标准化的正交旋转法。

由表6可知，2个因子的累计贡献率高达98.233%，可以很好的结解释7个指标的所有信息。由于因子的提取是采用主成分分析，第1个因子更为重要（贡献率更高）[8]。F_1 因子中 Q_m，MBC，PSI，RDP和平均解析率的荷载绝对值均大于0.9，说明 Q_m，MBC，PSI，RDP和平均解吸率5个指标可以反映磷素的流失风险。其中 Q_m，MBC和PSI 3个指标的为正荷载，说明磷的流失风险风险和数量首先取决于土壤的供磷能力，Q_m，MBC和PSI值越大，磷越不容易流失，这与张国林等[24]的研究结果一致。RDP和平均解吸率为负荷载，说明RDP和平均解吸率值越大，磷素越容易流失。本文以 Q_m，MBC，PSI，RDP和平均解吸率5个指标为判断依据，预测向家坝工程扰动区5种边坡生态防护工程生境基材的磷素流失风险，其大小依次为：植被混凝土＞框格梁覆土＞客土喷播＞厚层基材＞天然次生林。

4 结论

（1）5种边坡生态防护工程生境基材对磷的吸附符合Langmuir方程；Q_m，MBC和PSI 3个指标均从小到大依次为：天然次生林、客土喷播、厚层基材、框格梁覆土、植被混凝土，表明5种基材的固磷能力从大到小为：天然次生林＞客土喷播＞厚层基材＞框格梁覆土＞植被混凝土；Q_m 与基材的黏粒含量显著正相关，与有机质含量和pH值显著负相关。

（2）5种边坡生态防护工程生境基材对磷的解吸符合指数方程；磷的解吸能力和平均解吸率均为：植被混凝土＞框格梁覆土＞厚层基材＞客土喷播＞天然次生林；平均解吸率与pH值极显著正相关，与有机质含量显著正相关，与黏粒含量显著负相关。

（3）因子分析表明 Q_m，MBC，PSI、平均解吸率和易解吸磷（RDP）5个指标可以表示5种边坡上磷的流失风险，从大到小依次为：植被混凝土＞框格梁覆土＞客土喷播＞厚层基材＞天然次生林。

（4）结合吸附和解吸两方面，5种恢复方式中自然恢复的天然次生林对磷的保持能力最好，边坡防护工程恢复方式中对磷保持能力最差的是植被混凝土，因此从有利于磷素保持和利用的角度来考虑，为了使基材具有较强的磷吸附能力和较大的缓冲容量，在施工中应当增大基材中黏粒的比重，并适当减少水泥用量或加入缓冲物质，以使基材能够具有较强的磷吸附能力、较大的磷库容和较小的磷流失风险，从而提高磷素的利用率并具有持久的供磷能力。

[参 考 文 献]

[1] Nam-choon K. Ecological restoration and revegetation works in Korea[J]. Landscape and Ecological Engineering, 2005,1(1):77-83.

[2] Han Jianggang, Li Zibo, Li Ping, et al. Nitrogen and phosphorous concentrations in runoff from a purple soil in an agricultural watershed[J]. Agricultural Water Management, 2010,97(5):757-762.

[3] Pant H K, Reddy K R. Phosphorus sorption characteristics of estuarine sediments under different redox conditions[J]. Journal of Environmental Quality, 2001,30(4):1474-1480.

[4] Barrow N J. Reaction of anions and cations with variablecharge soils[J]. Advances in Agronomy, 1985(38):183-230.

[5] Xia Zhenyao, Xu Wennian, Wang Jianzhu. Ecological characteristics of artificial vegetation communities on excavated slopes at the Xiangjiaba hydroelectric power station[J]. Journal of Chongqing University: English Edition, 2009,8(2):75-81.

[6] 王彦，张进忠，王振华. 四川盆地丘陵区农田土壤对磷的吸附与解吸特征[J]. 农业环境科学学报，2011,30(10):2068-2074.

[7] 谢学俭，陈晶中，汤莉莉，等. 三种水稻土对磷的吸附解吸特性[J]. 土壤通报，2008,39(3):597-601.

[8] 刘海婷，赵阳，于瑞莲，等. 泉州市不同利用方式下土壤磷的吸附与解吸特性[J]. 生态学杂志，2011,30(6):1114-1118.

[9] 刘霄，黄岁樑，刘学功. 3种人工湿地基质对磷的吸附特性[J]. 环境工程学报，2012,6(10):3367-3372.

[10] 高超，张桃林，吴蔚东. 不同利用方式下农田土壤对磷的吸持与解吸特征[J]. 环境科学，2001,22(4):67-72.

[11] 贾学萍. 水稻土对无机磷、有机磷吸附—解吸的研究[D]. 南京：南京林业大学，2009.

[12] 李孝良. 几种水稻土对磷的吸附解吸特性研究[J]. 安徽农业技术师范学院学报，1999,13(1):21-26.

[13] 张红爱. 太湖地区典型水稻土土壤磷素径流流失及其吸持特征的研究. 安徽农业科学，2008,36(18):7788-7792.

[14] 黄东风，邱孝煊，李卫华，等. 福州市郊菜地土壤磷素特征及流失潜能分析[J]. 水土保持学报，2009,23(1):83-87.

[15] 周明涛，许文年，夏栋. 向家坝水电站工程扰动区不同类型边坡土壤酸碱度与肥力分析[J]，应用生态学报，2010,21(4):1031-1037.

[16] 邱亚群，甘国娟，刘伟，等. 不同利用方式土壤中磷的吸附与解吸特性[J]. 环境工程学报，2013,7(7):2757-2762.

（下转第357页）

3　讨论与结论

国内现有的山洪预警研究多集中于以下 2 个方面:第一,是时间预报技术,建立山洪预警系统,通过降雨等资料的输入,预测山洪发生的可能性和时间;第二,是空间预报技术,通过以综合指数法为例的多种方法,对山洪可能发生的范围进行划分,并对山洪沟道的危险程度进行评级。前者在国内的研究多集中在预警系统的结构和原理上,但针对具体地区,对系统内部水文模型的选择以及应用效果的研究较少,而本文填补了这方面的空缺。随着水文模型研究的发展,国内外学者不断地提出了适宜不同条件的水文模型以及各种模型的优化,精准度在逐步提高,因此本系统未来仍有一定的提升空间,山洪预警结果的准确性会得到更大的提高,同时可以在一定程度上降低错误预警的可能性并避免错误预警后造成的不必要的经济损失。

根据北京山区的具体情况,本文选择了适宜的产流和汇流模型,以及恰当的安全流量计算方法,因地制宜地构建了基于垂向混合产流模型的北京山区山洪预警模型。经过 2 个小流域 5 次历史降雨—流量资料的验证,表明由本研究构建的北京山区山洪预警模型对洪水过程的模拟结果均在允许误差范围之内,因此,本模型可以根据降雨资料较好地模拟出洪水过程曲线。模型出的是否会发生山洪的预测结果,与实际的历史情况相一致,表明了本模型预警的准确性。综上所述,本文建立的北京山区山洪预警模型,经过历史降雨—流量数据的验证,说明本模型具有符合要求的准确度,可以将其应用于北京山区的山洪预警,进行进一步的检验。

[参 考 文 献]

[1] Georgakakos K P. Analytical results for operational flash flood guidance[J]. Journal of Hydrology, 2006, 317(1/2):81-103.

[2] 刘志雨. 山洪预警预报技术研究与应用[J]. 中国防汛抗旱,2012,22(2):41-45.

[3] 胡维忠,叶秋萍,陈桂亚,等. 构建科学的山洪灾害监测预警系统[J]. 中国水利,2007(14):34-37.

[4] 孙加龙. 省级山洪灾害预警监测系统的开发[J]. 中国防汛抗旱,2012,22(1):34-36.

[5] 崔泰昌,陆建华. 试论蓄满产流模型与超渗产流模型[J]. 山西水利科技,2000(3):13-15.

[6] 瞿思敏,包为民,张明,等. 新安江模型与垂向混合产流模型的比较[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2003(4): 374-377.

[7] 田文苓. 混合产流模型及其应用[J]. 海河水利,1996(2): 7-10.

[8] 包为民,王从良. 垂向混合产流模型及应用[J]. 水文,1997(3):18-21.

[9] 王贵作,任立良. 基于栅格垂向混合产流机制的分布式水文模型[J]. 河海大学学报:自然科学版,2009,37(4): 386-390.

[10] 王庆平,沈国华,王红艳. 垂向混合产流模型在不同地区的应用与改进[J]. 节水灌溉,2012(5):11-15.

[11] 吴敬东,张洪江,段淑怀,等. 密云县蛇鱼川小流域地表水水质变化的规律[J]. 中国水土保持科学,2012,10(1):46-52.

[12] 吴敬东,叶芝菡,梁延丽,等. 密云水库上游蛇鱼川生态清洁小流域监测与评价[C]// 2008 年中国水土保持学会小流域综合治理与新农村建设研讨会,2008.

[13] 吴敬东,段淑怀,叶芝菡,等. 蛇鱼川生态清洁小流域水生态环境监测布设研究[J]. 水土保持通报,2009,29(2):70-72.

(上接第 352 页)

[17] 戴照福,王继增,程炯,等. 流溪河流域菜地土壤磷素特征及流失风险分析[J]. 广东农业科学,2006(4):82-84.

[18] 曹志洪,李庆逵. 黄土性土壤对磷的吸附与解吸[J]. 土壤学报,1988,25(3):218-226.

[19] 马良,徐仁扣. pH 和添加有机物料对 3 种酸性土壤中磷吸附—解吸的影响[J]. 生态与农村环境学报,2010,26(6):596-599.

[20] Yuan T L. Adsorption of phosphate and water extractable soil organic material by sythetic aluminum sillicates and acid soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1980,44(5):951-955.

[21] 王永,徐仁扣. 可变电荷土壤对水体中磷酸根的吸附去除作用[J]. 生态与农村环境学报,2008,24(4):63-67.

[22] 赵晓齐,鲁如坤. 有机肥对土壤磷素吸附的影响[J]. 土壤学报,1991,28(1):7-13.

[23] 刘子国,黄敏,余萃,等. 武汉市郊典型利用方式下土壤磷素特征及流失风险分析[J]. 环境科学与技术,2010,33(5):71-74.

[24] 张国林,钟继洪,曾芳,等. 土壤磷素的流失风险研究[J]. 农业环境科学学报,2007,26(5):1917-1923.

[25] 高秀美,汪吉东,刘兆普,等. 集约化蔬菜地土壤磷素累积特征及流失风险[J]. 生态与农村环境学报,2010,26(1):82-86.