

DOI:10. 3969/j. issn. 1004 - 6933. 2013. 04. 006

太湖典型小流域磷素流失特征分析

朱永澍¹, 向 龙^{1,2}, 余钟波^{1,2}, 陈 星¹

(1. 河海大学水文与水资源学院, 江苏 南京 210098;
2. 水文学与水资源及水利工程国家重点实验室, 江苏 南京 210098)

摘要:以宜兴梅林小流域为研究对象,采用数理统计和系统分析的方法,对典型降雨事件中不同种土地利用类型的磷素流失特征进行分析。结果表明,非点源污染物的流失总量和污染物的质量浓度依赖于降雨过程的产流特征和复杂的下垫面要素特征;不同土地利用类型上的磷素流失随降雨程度的不同而不同,旱地地区表面的磷素最容易随降雨流失,而植被较密林地的磷素流失缓慢;林地等植被覆盖较好下垫面的磷素主要以 $\text{PO}_4\text{-P}$ 的形态随降雨径流输出;土地的施肥程度、有机腐殖质等对磷素流失的影响不同,地表的扰动程度也直接决定磷素流失的特征。建议根据土地利用类型,通过工程和非工程措施对不同降雨阶段的磷流失特征进行调控,以减少太湖流域的非点源磷素污染。

关键词:磷素流失;非点源污染;数理统计;系统分析;太湖流域

中图分类号:X832 **文献标志码:**A **文章编号:**1004 - 6933(2013)04 - 0031 - 05

Characteristic analysis of phosphorus loss in typical watersheds of Taihu Basin

ZHU Yongshu², XIANG Long^{1,2}, YU Zhongbo^{1,2}, CHEN Xing²

(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing 210098, China;
2. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The characteristics of phosphorus losses during typical rainfall events in different land covers in the Meilin watershed, a small watershed located in Yixing City, were analyzed using mathematical statistics and systematical analysis methods. The results show that the total mass and concentration of non-point source pollutants depend on runoff characteristics and complex landscape characteristics. Phosphorus losses from different types of land are various at different rainfall levels, the surface phosphorus in dry-land areas is lost more easily than in woodlands, and the surface phosphorus in woodlands emigrates in the form of $\text{PO}_4\text{-P}$ in runoff. Fertilization and organic humus loss have different effects on phosphorus loss, and disturbance on the land surface determines the characteristics of phosphorus loss. It is suggested that engineering and non-engineering measures should be taken to control phosphorus loss from different types of land in different rainfall stages, in order to control the non-point source phosphorus pollution in the Taihu Basin.

Key words: phosphorus loss; non-point source pollution; mathematical statistics; systematical analysis; Taihu Basin

太湖流域是全国人口最稠密和经济发展最具有活力的地区之一,区域内水系纵横交错,湖群密布。位于流域中部的太湖是中国五大淡水湖之一,也是区域水生生态系统的核心水体^[1]。近年来太湖水体

基金项目:“十二五”国家科技支撑计划(2012BAK10B04);水文水资源与水利工程科学国家实验室开放基金(2011490805);国家自然科学基金(50979022,51209071);水利部公益性行业科研专项(201001030)

作者简介:朱永澍(1991—),男,本科生,专业为资源环境与城乡规划管理。E-mail: zys_hhu@163.com

通信作者:向龙,博士,讲师。E-mail: xianglonghhu@gmail.com

污染尤其富营养化现象日益严重。据我国湖泊水体调查结果,输入湖泊的污染物一半以上来自非点源污染^[2-3]。有关资料^[4]表明,太湖流域污染源中来自于农业面源、禽业养殖、城乡结合部面源3大来源的TP分别占20%、32%和23%,可见太湖农业非点源磷素流入是太湖污染的一个重要因素^[1]。众多研究发现,磷元素是水体富营养化的主要营养成分之一^[3],因此,在氮素浓度普遍过剩的太湖流域^[4-5],磷元素成为控制水体富营养化的关键指标^[6],研究流域非点源的磷元素流失特征有利于进一步探索控制太湖污染的方法^[5-6]。

目前,流域磷素流失的研究主要通过室内实验^[7]、野外实地观测分析^[8-9]、分布式水文径流模拟研究(如ANSWERS模型、SWAT模型、EPIC模型、HSPF模型、APNGS模型、DWSM模型等)^[7,10],以及利用数理统计方法^[11]建立污染负荷与影响因子相关关系法等^[7]。我国对非点源污染的系统研究起步较晚,直接观测分析流域磷素流失与水文过程特征的研究不多,而且相关模型研究尚不能适应复杂多变的流域下垫面情况^[9]。在野外尺度上,非点源磷素污染负荷的控制研究还在起步阶段^[10-13]。本研究利用不同下垫面的野外监测实验观测场连续观测水文径流过程中的磷元素流失情况,揭示降雨径流过程中不同土地利用类型的磷素流失特征。

1 研究区概况与实验

1.1 研究区概况

梅林实验小流域位于太湖流域内,东距太湖约9 km(31°20'N,119°51'E),为典型的太湖流域低山丘陵区,地处宜兴市东南,面积为0.737 km²,流域边界清楚。该地区处于亚热带季风气候区,气候温和湿润,常年主导风向为东南风,年平均气温为15.7℃,年平均降雨量1177 mm,降雨类型主要为6—7月的“梅雨”和8—9月的台风对流雨。该地区海拔最高达60多m,最低处为3m多。流域内土壤类型以红黄壤(旱地)和黏壤土(水稻田)为主。该流域代表典型的农业耕作区,土地利用类型以耕地为主,有旱地、水稻田、竹林、板栗林、菜地等,见图1。流域内只有几户承包果园的外来户,基本没有工业污水排放,因此流域出口断面水质状况可以代表该地区的非点源污染状况。

为了监测“水文-溶质”迁移过程的同步数据,在实验流域设置了一系列的野外监测设施:在已有实验小区和地下水观测井的基础上,重新安装调试压力式水位计、FDR土壤含水率传感器、ISCO-6721自动采样仪以及简易气象站、翻斗式自动雨量计等。按

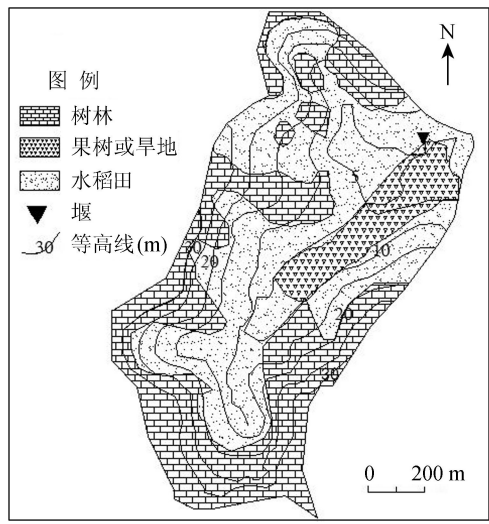


图1 梅林小流域土地利用及地形

实验区不同植被覆盖情况,选取4种类型的5个实验小区,分别是杨家山坡地、板栗林、竹林、旱地和菜地。

1.2 实验

实验中,径流小区保留原有的耕作和施肥方式。实验期间,记录每次施肥的种类、数量及时间;每次降雨前,测定土壤背景的磷素浓度和含水率;降雨径流发生时,采集流域降水过程、试验场地表径流过程中的水样,并测定地表水和壤中流中的磷的质量浓度。为了全面了解磷素的流失特征,在降雨径流开始后连续观测,频率约10 min/次,同时记录时段地表水产流量。取得野外水样后低温保存,并尽快送回实验室完成水样分析。

进行室内磷素分析时,先将水样静置3 h,抽取上清液测定滤前TP、可溶性总磷(DTP)和可溶性正磷酸盐(PO₄-P)的质量浓度,其中将PO₄-P质量浓度作为可溶性无机磷质量浓度。滤前TP质量浓度与DTP质量浓度相减可得悬浮态吸附磷质量浓度。用“过硫酸钾消解-钼锑抗”分光光度法测定滤前水样中和滤后水样中的TP、DTP,用钼蓝比色法测定滤后水样中的PO₄-P^[10]。

2 数据分析与讨论

2.1 降雨特征分析

将2010-07-11和2010-07-13典型的降雨径流过程作为实验事件进行分析,用P1表示事件2010-07-11,P2表示事件2010-07-13。P1是一个土壤缺水量较低的暴雨过程,累计降雨量46.5 mm,各实验区的产流量较小,介于7.1~18.2 mm;P2是一个土壤缺水量较高的暴雨径流过程,累计降雨量17 mm,各实验区的产流量介于2.9~13.6 mm(表1)。根据各实验区的土地利用类型和耕作地貌,植被的截留对径流形成的影响较明显,如旱地的植被较少,地

面平坦且坡度适宜,其地表径流最大。另外,实验区土壤的缺水量对地表径流的产生也有明显作用,见表1。从降雨径流产生过程看,地表径流的产生与时段雨强的关系极为明显。P1的降雨虽然雨量大,但持续时间长约10 h(图2),而P2的降雨历时不到1.5 h;两场降雨的产流系数也各不相同。这两场降雨过程代表了研究区典型的径流形成特征。

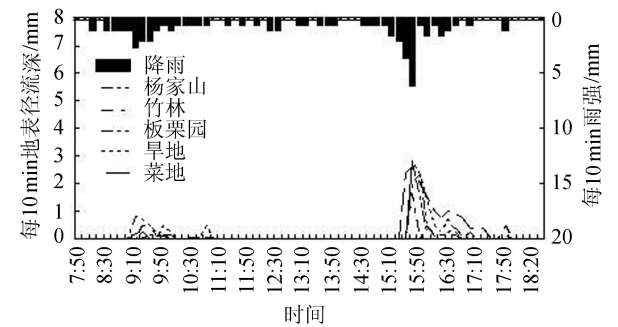


图2 P1降雨径流产生过程

2.2 2次降雨的磷素流失特征分析

流域的非点源磷素输移与降雨的特征直接相关,它不仅与径流多少有关,而且与流量强度及携沙量直接相关。观测实验中,同场次降雨中磷素的输出量还与下垫面扰动情况相联系。经分析,5个实验小区的磷素直接径流流失总量因下垫面情况的不同而有着明显差异,见表1。菜地小区由于人类耕作扰动剧烈,地表径流磷素的流失量为2583.1 mg,相对于其他小区明显较高,而其他小区的磷素流失量则处于大致均衡水平,高出流域平均磷素流失量的6.8倍,地表径流产污贡献率高达90%。其他各小区的地表径流产污贡献率基本持平,仅竹林略低。

雨强是驱动非点源磷素流失的另外一个重要因素。实验中,P1的降雨总量为46.5 mm,远大于P2的降雨量,且前者的磷素流失总量也高于后者。但从单位径流携带磷流失的贡献率看,P2的磷素流失贡献率大于P1,这说明磷素的流失量与降雨强度呈

正相关趋势。菜地和竹林的地表径流产污贡献率与总雨量关系更为密切,其原因可能是耕作地的地形和植被截留作用对径流产污产生影响。由于P1的降雨使小区地表填注充满,滞留于填注的磷素得以汇入地表径流,使得地表径流的磷素流失贡献率升高。而菜地、竹林的地表径流磷素流失贡献率下降,主要是因为小区地形条件和植被截留作用使得较小降雨(P2)未能填满小区中的洼地,磷素滞留在实验小区。

从5个实验小区的地表径流磷素流失贡献率可以看出,通过地表径流流失的磷素量在磷素流失总量中占有较大比重,说明地表水对磷素的迁移过程有较大的影响。这也表明,非点源污染物的流失总量和污染物的质量浓度依赖于降雨产流过程的特征,也依赖于复杂的下垫面要素特征。

磷素的组成比较复杂,不仅包括可溶性的磷素,还包括吸附态的磷素。本实验测定过滤后的TP和水样中的PO₄-P,以区分不同下垫面的磷素各组分的流失特征。从表2可看出,由于小区下垫面条件不同,流失磷素的组成也各有差异。植被覆盖较好的板栗林和竹林,其产流强度较小,携沙较少,吸附悬浮态的磷流失较少,有机磷素流失相对较多,可溶性磷流失贡献率较高。板栗林可溶性磷流失贡献率为61.12%,竹林可溶性磷流失贡献率为42.40%,无机可溶性磷(PO₄-P)流失贡献率仅占6.17%。旱地植被覆盖较差,并且坡度较大,大量泥沙随降雨冲刷流失,磷素流失以悬浮态磷为主,可溶性磷素相对较少,可溶性磷素流失贡献率仅为31.04%。旱地少植被,有机磷在土壤中含量较少,无机可溶性磷(PO₄-P)流失贡献率为28.30%;而竹林中有较多落叶,土壤腐殖质中含有较多的有机磷,因此无机可溶性磷(PO₄-P)流失贡献率相对较低,仅为6.17%。

表1 典型降雨径流实验的总磷流失情况

实验区	实验事件	累积降雨量/mm	累积径流深/mm	地下水磷素质量浓度/(mg·L ⁻¹)	小区面积/m ²	地表收集水量/L	地表流失磷素总量/mg	流失总磷素量/mg	地表径流磷素流失贡献率/%
板栗林	P1	46.5	7.9	0.0536	40	317.70	222.80	305.50	72.92
	P2	17.0	4.7	0.0602	40	188.00	120.40	150.00	80.26
菜地	P1	46.5	15.4	0.1933	40	615.00	2342.40	2583.10	90.68
	P2	17.0	2.9	0.2035	40	116.00	246.10	360.80	68.20
旱地	P1	46.5	18.2	0.0905	40	728.90	104.10	206.50	50.42
	P2	17.0	13.6	0.0905	40	544.00	40.10	52.30	76.49
杨家山	P1	46.5	7.1	0.0552	33	232.90	127.00	198.90	63.85
	P2	17.0	8.8	0.0652	33	290.40	127.60	145.20	87.86
竹林	P1	46.5	10.7	0.0896	40	429.90	105.60	233.70	45.17
	P2	17.0	8.4	0.1068	40	336.00	17.40	54.10	32.19
平均				0.1008		379.88	345.35	429.01	66.80

注:地表流失磷素由地表水中磷的质量浓度与时段径流量求得;流失总磷素量由地表流失磷素总量与地下磷素流失总量之和求得。

表 2 P1 中 TP、DTP、PO₄-P 的流失情况

实验区	累积雨量/ mm	径流深/ mm	PO ₄ -P 流失 总量/mg	可溶性磷流失 总量/mg	地表流失 磷素总量/mg	流失总磷 素量/mg	可溶性磷流失 贡献率/%	PO ₄ -P 流失 贡献率/%	地表流失磷素 贡献率/%
板栗林	46.5	7.9	140.6	186.7	222.8	305.5	61.12	46.00	72.92
菜地	46.5	15.4	875.5	1808.8	2342.4	2583.1	70.03	33.90	90.68
旱地	46.5	18.2	58.4	64.1	104.1	206.5	31.04	28.30	50.42
竹林	46.5	10.7	14.4	99.1	105.6	233.7	42.40	6.17	45.17

由表 2 可知,流域的下垫面条件、地表植被覆盖情况等要素有所差异,磷素随地表径流迁移的形态也各不相同。明确不同土地类型上磷素迁移的形态特征,可对磷素的非点源污染加以评估和控制。

2.3 不同种土地利用类型中磷素的流失特征

流域非点源磷素的流失不仅与降水总量相关,而且还依赖于降水过程的变化特征。图 3 反映了 P1 降雨过程中板栗林、菜地及早地水样中总磷 TP、DTP 和 PO₄-P 的质量浓度情况。对板栗林、旱地以及菜地 3 个典型下垫面的产流产污特征进行分析。

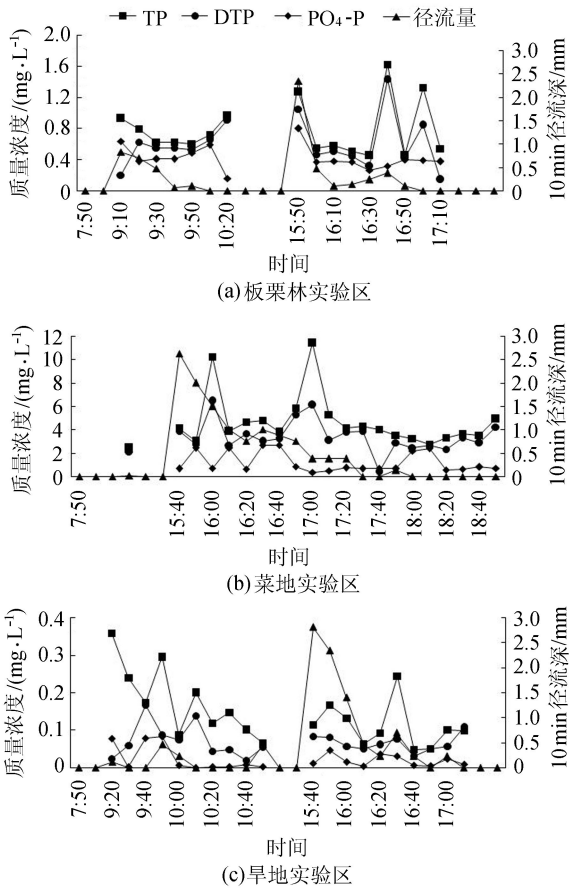


图 3 实验区磷素 (TP、DTP 以及 PO₄-P) 流失过程

板栗林(图 3(a))实验区在产流初期径流量较少,磷素流失主要是以 DTP 为主,DTP 与 TP 质量浓度处于相对较低的稳定水平,直到 10:20 停止产流。在 16:00 之后再产流,并且径流量很快达到峰值,在 0.5 h 之后,水体中 TP 的质量浓度升高至 1.6 mg/L,径流量也急剧增加,土壤含水量逐渐达到饱和,下垫面填注充满,板栗林植被涵养水土能力下降,大量泥

沙随地表径流流失,悬浮态磷的比例也相对升高,TP 流失量也显著增加。

菜地(图 3(b))下垫面土质较为疏松且地表起伏不平,初期产流系数较小,降雨过程前期未有明显产流。第 2 次降雨高峰时(15:40)开始产流,菜地小区的 TP 质量浓度达到 11.35 mg/L,远远大于其他实验小区。这主要因为菜地受人类施肥活动的影响最大,表层含磷量高;在每 10 min 的径流量达到峰值 2.6 mm 后,TP 质量浓度呈现急剧上升趋势。这主要因为菜地下垫面特殊,有较多田垄和沟洼,降雨中后期雨水把地表洼地填满,造成滞留在洼地的磷素集中产出。

旱地(图 3(c))坡度较大且表面平整,在降雨过程初期(9:20),实验区开始产流。由于旱地植被覆盖较少,水土涵养能力差,降雨初期大量泥沙随地表径流流失,悬浮态磷是磷素流失的主要形态,直到 10:50 产流停止。第 2 次降雨峰时(15:40),虽然径流量有所升高,达到 2.75 mm/h,但磷素质量浓度逐渐趋于 0.2 mg/L 的平稳水平。可见,相对于植被较少的旱地,磷素流失大部分集中在产流初期,流失的可溶性磷中以无机态磷 PO₄-P 为主。

3 结 论

对典型降雨事件中不同利用类型土地的磷素流失特征进行分析,可以看出,非点源污染物的流失总量和污染物的质量浓度依赖于降雨产流过程的特征,也依赖于复杂的下垫面要素特征。

a. 不同利用类型土地上的磷素流失随降雨强度的不同而不同,旱地地区表面磷素最容易随降雨流失,而植被较密林地的磷素流失缓慢。

b. 林地等植被覆盖较好的下垫面,磷素主要以 PO₄-P 的形态随降雨径流输出,PO₄-P 的质量浓度的变化趋势与 TP 相似,变化过程较为平稳。而流失的悬浮态磷的质量浓度变化较大,初次产流阶段质量浓度较高,之后变化相对平缓。表明水土流失造成的磷流失风险更大。

c. 土地的施肥程度、有机腐殖质等,对磷素流失的影响不同。菜地等人为因素影响较大的地区,由于施肥频繁,植物对肥料的吸收和利用率低,导致大量磷素流失。地表扰动程度,如菜地的微地形和

旱地的坡度,也直接决定磷素流失的特征。

针对流域非点源磷素的流失特征,可根据土地利用类型,通过工程和非工程措施对不同降雨阶段的磷素流失特征进行调控,以减少太湖流域的非点源磷素污染。

参考文献:

[1] 崔广柏.太湖流域富营养化控制机理研究[M].北京:中国水利水电出版社,2009.

[2] 王辉.太湖西苕溪流域非点源污染研究述评[J].首都师范大学学报:自然科学版,2011(5): 52-56. (WANG Hui. Review on non-point source pollution in Xitiaoqi Basin[J]. Journal of Capital Normal University: Natural Science Edition,2011(5): 52-56. (in Chinese))

[3] 叶飞,卞新民,胡大伟,等.江苏省农业非点源污染地区差异评价与控制对策[J].水资源保护,2006,22(6):86-88. (YE Fei, BIAN Xinmin, HU Dawei, et al. Regional difference and countermeasures of agricultural non-point source pollution in Jiangsu Province[J]. Water Resources Protection,2006,22(6):86-88. (in Chinese))

[4] 曾远,张永春,范学平.太湖流域典型平原河网区降雨径流氮磷流失特征分析[J].水资源保护,2007,23(1): 25-27. (ZENG Yuan, ZHANG Yongchun, FAN Xueping. Characteristics of nitrogen and phosphorus loss of rainfall runoff in typical plain river-net area of Taihu Lake Basin[J]. Water Resources Protection,2007,23(1): 25-27. (in Chinese))

[5] 夏立忠,杨林章.太湖流域非点源污染研究与控制[J].长江流域资源与环境,2003(1):45-49. (XIA Lizhong, YANG Linzhang. Research on non-point source pollution in Tailake Region[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin,2003(1):45-49. (in Chinese))

[6] 高超,朱建国,窦贻俭.农业非点源污染对太湖水质的影响:发展态势与研究重点[J].长江流域资源与环境,2002(3): 260-263. (GAO Chao, ZHU Jianguo, DOU Yijian. Contribution of agricultural non-point source pollution to water quality deterioration in Taihu Lake watershed: recent trends and research priorities [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin,2002(3): 260-263. (in Chinese))

[7] 梁威,刘凌.在土槽尺度下的硝态氮迁移模拟研究[J].湖泊科学,2007,19(6): 710-717 (LIANG Wei, LIU Ling. Simulation of nitrate-nitrogen transfer in trough scale [J]. Journal of Lake Sciences,2007,19(6):710-717. (in Chinese))

[8] XIANG Long, YU Zhongbo, CHEN Li, et al. Evaluating the characteristics of hydraulic driven non-point source pollution yield in agricultural watershed [J]. Applied Mechanics and Materials,2012,212/213:518-524.

[9] 李杨,马晓明.深圳坪山河流域土地利用变化对流域非点源污染负荷的影响[J].水资源保护,2012,28(2):

42-45. (LI Yang, MA Xiaoming. Impacts of land-use change on non-point source pollution load in Pingshan River Watershed in Shenzhen City [J]. Water Resources Protection,2012,28(2):42-45. (in Chinese))

[10] 李怀恩.流域非点源污染模型研究进展与发展趋势[J].水资源保护,1996(2): 14-18. (LI Huaien. Research progress and development trend of watershed non-point source pollution model [J]. Water Resources Protection,1996(2):14-18. (in Chinese))

[11] 朱红霞,陈效民.太湖地区旱季、雨季水体污染影响因素分析[J].农业环境科学学报,2008,27(6):2394-2400 (ZHU Hongxia, CHEN Xiaomin. Water pollution impact analysis in the dry season and the rainy season of Taihu Lake Region [J]. Journal of Agro-Environment Science,2008,27(6):2394-2400. (in Chinese))

[12] 张雪刚,毛媛媛,董家瑞,等. SWAT 模型与 MODFLOW 模型的耦合计算及应用[J].水资源保护,2010,26(3):49-52. (ZHANG Xuegang, MAO Yuanyuan, DONG Jiarui, et al. A coupled model simulation and application of SWAT-MODFLOW [J]. Water Resources Protection, 2010,26(3):49-52. (in Chinese))

[13] 吕贤弼,张思聪,武晓峰,等.基于汛期土壤养分的非点源污染模型初步研究[J].水资源保护,1996(4):37-40. (LV Xianbi, ZHANG Sicong, WU Xiaofeng, et al. Preliminary study based on non-point source pollution model of the flood season soil nutrient [J]. Water Resources Protection,1996(4):37-40. (in Chinese))

(收稿日期:2013-03-14 编辑:彭桃英)

+++++

• 简讯 •

第 12 次全国水利水电地基与基础工程
学术交流会将于 2013 年 8 月召开

由中国水利学会地基与基础工程专业委员会主办,中国水电基础局有限公司、黑龙江省水利水电勘测设计研究院承办的第 12 次全国水利水电地基与基础工程学术交流会将于 2013 年 8 月召开,会议将总结、交流、推广水利水电建设中地基处理和基础工程的新经验、新技术。会议的主要议题有:①地基与基础工程的科学研究;②地基与基础工程的勘测;③各种地基处理与基础工程的设计;④各种地基处理与基础工程的施工技术;⑤地基与基础工程的新材料的研发与应用;⑥地基与基础工程新设备的研发与应用;⑦地基与基础工程的监测与检测技术;⑧地基与基础工程的质量与安全管理。本次技术交流会将公开出版论文集。

联系地址:天津市武清区雍阳西道 86 号
邮编:301700 联系人:李玲
联系电话:022-29362165

(本刊编辑部供稿)