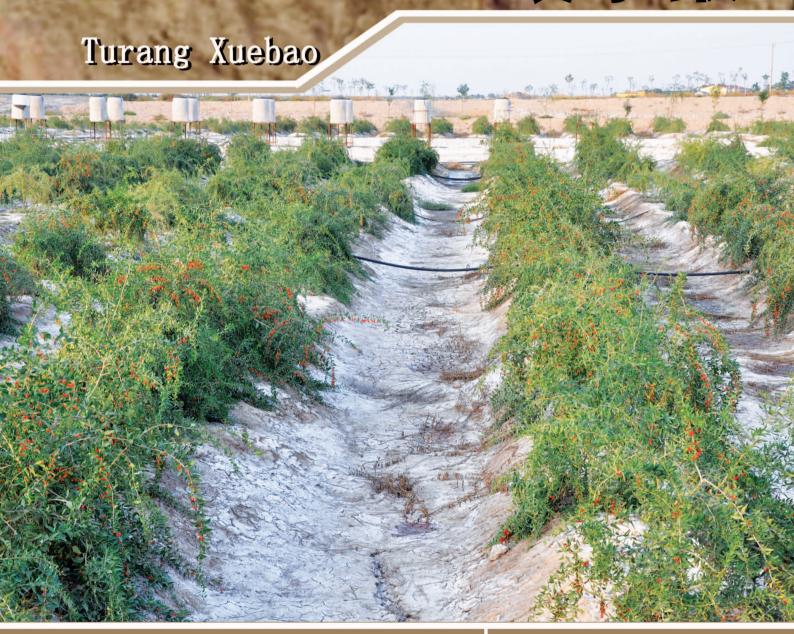
ISSN 0564-3929

# Acta Pedologica Sinica 土壤学报





2015

第 52 卷 第 6 期

Vol.52 No.6



# 土壤学报

(Turang Xuebao)



## 第 52 卷 第 6 期 2015 年 11 月

目 次

#### 综述与评论

耕地地力评价指标体系构建中的问题与分析逻辑	赵彦锋	程道全	陈 杰等(1197)
蚯蚓对土壤温室气体排放的影响及机制研究进展	卢明珠	吕宪国	管 强等(1209)
研究论文			
高寒山区地形序列土壤有机碳和无机碳垂直分布特征及其影响因素…	杨 帆	黄来明	李德成等(1226)
中国中、东部典型县域土壤与地表水体多样性的粒度效应及关联性·		· 任圆圆	圆 张学雷(1237)
渭北台塬区耕地土壤速效养分时空变异特征	… 于 氵	羊 赵业妇	亭 常庆瑞(1251)
黄河三角洲土壤含水量状况的高光谱估测与遥感反演	李 萍	赵庚星	高明秀等(1262)
干湿交替对黄土崩解速度的影响	王 健	马 璠	张鹏辉等(1273)
晋陕蒙接壤区露天矿层状土壤水分入渗特征与模拟	吴奇凡	樊 军	杨晓莉等(1280)
旱作褐土中氧化铁的厌氧还原与光合型亚铁氧化特征	孙丽蓉	王旭刚	徐晓峰等(1291)
流动电位法研究高岭石胶体对包铝石英砂zeta电位的影响 ······		·· 李忠意	意 徐仁扣(1301)
近10年中国大陆主要粮食作物氮肥利用率分析		… 于 -	飞 施卫明(1311)
太行山山麓平原30年间土壤养分与供肥能力变化	刘建玲	贾可	廖文华等(1325)
亚热带丘陵小流域土壤碳氮磷生态计量特征的空间分异性	杨 文	周脚根	王美慧等(1336)
塔里木盆地北缘绿洲土壤化学计量特征	李红林	贡 璐	朱美玲等(1345)
东北平原土壤硒分布特征及影响因素	戴慧敏	宫传东	董 北等(1356)
浙江南部亚热带森林土壤植硅体碳的研究	林维雷	应雨骐	姜培坤等(1365)
土壤菲多次叠加污染对蚯蚓的毒性效应	马静静	钱新春	张 伟等(1374)
有机肥对黄瓜枯萎病的防治效果及防病机理研究	赵丽娅	李文庆	唐龙翔等(1383)
滴灌枸杞对龟裂碱土几种酶活性的改良效应	张体彬	康跃虎	万书勤等(1392)
石羊河流域中下游浅层地温变化及其对气温变化的响应	杨晓玲	丁文魁	马中华等(1401)
高放废物处置库预选场址包气带土壤渗透性研究	李杰彪	苏 锐	周志超等 (1412)
研究简报			
基于TM数据的黑土有机质含量空间格局反演研究	宋金红	吴景贵	赵欣宇等(1422)
陕西省玉米土壤肥力与施肥效应评估	单 燕	李水利	李 茹等(1430)
宇宙射线土壤水分观测方法在黄土高原草地植被的应用	赵 纯	袁国富	刘 晓等(1438)
信息			
《土壤学报》入选"2015期刊数字影响力100强"			(1437)
<b>村面图片</b> 。 溶薄构和歌自角列碱工重度 <u></u>			

封面图片:滴灌枸杞改良龟裂碱土重度盐碱荒地(由张体彬提供)

DOI: 10.11766/trxb201412090635

# 高放废物处置库预选场址包气带土壤渗透性研究\*

李杰彪 苏 锐 周志超 郭永海 季瑞利 张 明

(核工业北京地质研究院,中核高放废物地质处置评价技术重点实验室,北京 100029)

摘 要 在高放废物地质处置库选址和性能评价过程中,水文地质条件是其中最要的因素之一,而包气带土壤渗透性又是水文地质研究中的核心问题之一。甘肃北山地区是我国高放废物地质处置库场址首选预选区,新场—向阳山地段是北山预选区的重点候选场址之一。为查明该地区包气带土壤渗透性特征,本文选用双环法和Guelph入渗仪法两种试验方法开展包气带土壤渗透性的研究并综合分析了影响土壤渗透性的主要因素。结果表明:(1)区内包气带土壤渗透性能差异较大。总体来看,沟谷地带的土壤饱和渗透系数( $K_{fs}$ )大于缓坡地带,缓坡地带 $K_{fs}$ 大于平滩地带;(2)构造影响带 $K_{fs}$ 很大,不同构造影响带 $K_{fs}$ 存在一定的差异;(3)研究区包气带土壤渗透性的最主要影响因素是粒径>0.5 mm的粗砂与粒径<0.1 mm的极细砂、粉粒及黏粒含量,而粒径为0.5~0.1 mm的中砂、细砂含量影响最小。

关键词 土壤渗透性;新场-向阳山预选场址;高放废物处置

中图分类号 S152.7 文献标识码 A

高放废物具有放射性强、毒性大、核素半衰期长以及发热量大等特点<sup>[1]</sup>。高放废物的安全处置已成为关系到我国核工业可持续发展、环境保护和公众健康保障的重大问题<sup>[2]</sup>。目前,国际上普遍接受的可行性方案是对高放废物实施深地质处置,即把高放废物埋藏在距离地表深约500~1 000 m的地质体中,使之与人类的生存环境永久隔离。埋藏高放废物的地下工程称为"高放废物处置库"<sup>[3]</sup>。对处置库而言,最有可能使处置库中的放射性核素释放并进入生物圈的机制是地下水的作用。因此,预选区场址的水文地质条件研究是处置库选址过程中的重要依据之一。而包气带土壤渗透性又是水文地质条件研究中不可或缺的参数<sup>[4-5]</sup>。

甘肃北山地区是我国高放废物处置库的首选 预选区。根据多年野外调查,北山地区没有常年性 的河流和地表水体,因此该区地下水主要来自当地 大气降水的垂直入渗补给<sup>[6-8]</sup>。而地下水接受降水 入渗补给的能力很大程度上取决于包气带的渗透性 能。因此,开展土壤渗透性研究对于查清北山地区 的大气降水入渗补给,揭示北山地区的地下水形成 和循环交替特征,进而为后期进行地下水流数值模 拟及开展核素迁移研究提供有力的数据支持。

目前,土壤渗透性的测定方法很多,主要有渗坑法、单环法、双环法、环刀法、人工降雨法、入渗仪法、土柱法、钻孔法及稳定通量法等<sup>[9]</sup>。不同的方法具有各自的优缺点,本次研究在综合考虑研究区地质条件及每种方法优缺点的基础上,采用双环法和Guelph入渗仪法相结合的方式研究该区包气带土壤的渗透性特征。

双环法原理较简单,其应用也最广。Guelph 入渗仪是加拿大Elrick教授及其同伴合作研制的。它主要由供水量测系统、入渗部件和支架等部分组成。其在设计上运用了马氏瓶原理,使入渗水头在入渗过程中保持恒定<sup>[10-11]</sup>。与双环法相比,Guelph入渗仪法具有快速简便、用水量少、其考虑三维并且能够测定土壤不同深度的渗透性等优点。我国自20世纪80年代引进该方法以来,已开展了大量的研究工作。例如:Guelph入渗仪测定方

作者简介:李杰彪(1987—),男,河北冀州人,硕士,助理工程师,主要从事核废物地质处置、水文地质研究。E-mail: hgylijiebiao@126.com

<sup>\*</sup>核设施退役及放射性废物治理专项项目(科工二司[2014]305号)资助

法研究<sup>[12]</sup>、Guelph入渗仪法与其他测定方法的对比<sup>[13-14]</sup>、利用Guelph入渗仪开展不同土地利用方式下土壤渗透性特征研究<sup>[15-16]</sup>等。虽然Guelph入渗仪法在我国部分地区得到了较好应用,但其在极旱荒漠地区的应用案例极少。因此,开展此项工作对于推进Guelph入渗仪法在极旱荒漠地区的应用也具有一定的意义。

基于以上原因,本研究在甘肃北山预选区新场-向阳山预选地段,综合选用双环法和Guelph人渗仪法两种原位渗水试验方法,开展包气带土壤渗透性的研究并初步分析了影响渗透性的因素,通过研究旨在为深入研究该地区土壤水分运动特征、揭示该区的地下水形成和循环交替特征提供可靠的数据支持,进而为预选区选址和性能评价提供依据。

#### 1 材料与方法

#### 1.1 研究区概况

研究区位于甘肃省河西走廊以北的北山地区,行政区划隶属甘肃省肃北县和玉门市管辖。南距兰新铁路和312国道约70 km,有简易公路可达至312国道黄闸弯地段。地理坐标为:40°43′~40°53′N,97°23′~98°00′E(如图1所示)。

研究区地理纬度和海拔高度较高,降水量少,蒸发量大,干燥多风,植被稀少,冬冷夏热,属典型的大陆性气候。区内多年平均降水量约70 mm,降水具有明显的季节性特点。研究区西部年平均气温约4  $^{\circ}$ 、年蒸发量约3 100 mm;东部年平均气温约5  $^{\circ}$ 、年蒸发量增高至3 500 mm左右。

根据按地下水分布的地形、地貌、岩性及地质构造条件,区内地下水可划分为三种类型:基岩裂隙水;沟谷洼地孔隙-裂隙水;盆地孔隙-裂隙水。基岩裂隙水广泛分布于不同时代的变质岩、岩浆岩、碎屑岩、碳酸岩中,是区内主要的地下水类型。研究区沟谷洼地十分发育,沟谷洼地的主要特点是上部分布有厚度不等(一般小于10 m)的第四系砂砾石冲积层,其中含有水量较为丰富的孔隙潜水,涌水量在100 m³ d¹内。第四系砂砾石冲积层下部是基岩风化壳或构造破碎带,含有丰富的基岩裂隙水。盆地孔隙-裂隙水主要分布于东北部的山间盆地,这些盆地均为中、新生界盆地,广泛分布白垩系、侏罗系和第四系地层,地下水多呈层状分

布,上部多为潜水,主要来源是当地降水及暂时性 地表水的入渗补给;下部多为基岩裂隙承压水,水 位可高出地表,其主要补给来源是上游地下水的侧 向补给。

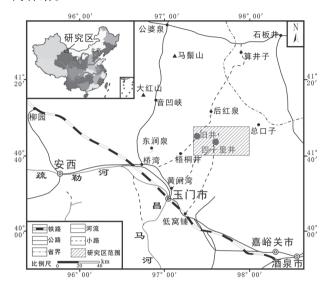


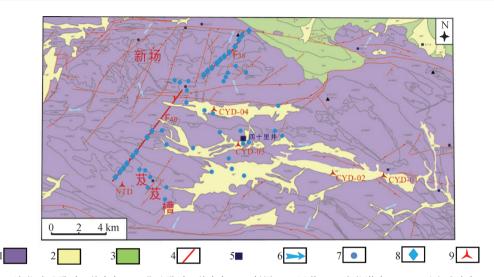
图1 研究区交通位置图

Fig. 1 Location of the study area

#### 1.2 点的布置及研究方法

为了解区内包气带中土壤渗透性特征,在综合分析区域构造特征、包气带厚度(研究区包气带厚度较小,一般为1~3 m)、包气带岩性和操作的可实施性等基础上,按照以下四类情形布置试验点:

- (1)为确定不同地貌单元包气带土壤渗透性的差异,采用双环法对区内平滩(小型山间盆地)、冲沟、斜坡三种不同地貌单元展开研究(共实施55组)。
- (2)由于构造带是地应力集中释放造成的破裂变形地带,常构成有特殊意义的水文地质体,在条件适宜的情况下,断裂带可兼具储水空间、集水廊道和导水通道的功能。因此,为进一步比较主要构造影响带的富水特性,在新场、芨芨槽地段选取典型构造影响带(F<sub>35</sub>、F<sub>40</sub>)采用Guelph入渗仪法展开研究(共实施19组)。
- (3)为揭示包气带土壤渗透性垂向上的变化及 其影响因素,在四十里井盆地布置4个剖面(能代表 盆地包气带土壤类型)分层开展Guelph入渗试验。
- (4)由于研究区内黏土地区占有一定的比重,目前还缺乏定量认识。基于此,在芨芨槽选择1个典型剖面布置试验点(NTD)开展Guelph入渗试验。



1-基岩裂隙水, 2-沟谷洼地孔隙-裂隙水, 3-盆地孔隙-裂隙水, 4-断层, 5-民井, 6-沟谷潜水, 7-双环法试验点, 8-Guelph入渗 仪法试验点(主要构造影响带), 9-Guelph入渗仪法试验点(四十里井盆地地区和黏土地区)

1-Bedrock fissure water, 2-Valley depression pore - fracture water, 3-Basin pore - fracture water, 4-Fault, 5-Well, 6-Gully phreatic flow, 7-Double-ring infiltration test points, 8- Guelph test points (along the main fault), 9-Guelph test points (in Sishilijing basin and clay test site)

图2 试验点分布图

Fig. 2 Distribution of the experimental points

上述试验点的分布如图2所示。

试验点均选择在未受人为扰动的地点进行。在主要构造影响带开展Guelph入渗试验时采用均匀布点的原则,试验距离为150~200 m,试验深度为20~35 cm。在四十里井盆地开展Guelph入渗试验时,每个深度段试验结束后在相同的深度内用80×75 mm²环刀采集原状土样3个,现场用0.01 g精度的电子天平称重并计算天然密度。原状土样采集完成后,另取约2 kg相同深度的土样装入自封袋中,在自封袋内空气排出后密封好,送实验室作样品的处理和相关测试。

室内测试项目包括:土壤重量含水量、土壤颗粒分析、土壤pH、有机质含量以及土壤离子总量。土壤颗粒分析及pH测定在国家建筑材料工业地质工程勘查研究院测试中心完成。土壤颗粒分级采用美国制土壤粒级分类标准,根据现场观察到的土质类型,本次研究将土壤粒级分为三级:>0.5 mm的粗砂,0.5~0.1 mm的中砂、细砂,<0.1 mm的极细砂、粉粒及黏粒。土壤有机质含量在北京市理化分析中心完成。土壤离子总量送国土资源部地下水矿泉水及环境监测中心测试。其余项目均在中核高放废物地质处置评价技术重点实验室独立完成。利用SPSS19.0统计软件进行试验数据的处理及分析。

## 2 结果与讨论

#### 2.1 土壤饱和渗透系数特征

不同地貌单元土壤渗透性大小如图3所示。可以看出:区内平滩的垂向渗透能力最差,土壤饱和渗透系数(Soil saturated hydraulic conductivity, $K_{fs}$ )均值仅为7.69×10<sup>-6</sup> m s<sup>-1</sup>,这主要是由于平滩地区沉积物颗粒较细,土壤多以粉粒、黏粒为主;冲沟渗透能力最强, $K_{fs}$ 均值可达4.0×10<sup>-5</sup> m s<sup>-1</sup>,这与沟谷沉积物多以砂粒为主,且大气降水易汇集于沟谷,水动力条件相对较强密切相关;缓坡地带渗透能力居中,均值为1.6×10<sup>-5</sup> m s<sup>-1</sup>。通过以上分析得知,冲沟地带是研究区地下水的主要补给区。

不同构造影响带渗透性试验结果如图4所示。由图可知新场地区典型构造影响带( $F_{35}$ ) $K_{fs}$ 均值大于芨芨槽典型构造影响带( $F_{40}$ )。这是由于相对而言,新场地区构造影响带更宽、切割更深、其土壤粒径也相对较粗所致。两个地区 $K_{fs}$ 平均值分别高达 $2.75\times10^{-4}$  m s<sup>-1</sup>、 $9.37\times10^{-5}$  m s<sup>-1</sup>,可见主要构造影响带是该区大气降水人渗最重要的补给区。由此得知,大型构造影响带是地下水活动最积极的地带,在处置库场址选择时应避开。

为了更加清楚地了解研究区不同土质类型土

壤的 $K_{fs}$ ,将所有试验点按土壤质地进行分类,可以分为三类:以中砂、粗砂为主的土壤,主要分布在构造影响带中;以粉粒、细砂为主的土壤,主要分布在盆地中;以黏粒为主的黏土地区( $K_{fs}$ 值本次取NTD 0~45 cm深度内的平均值)。为定量比较这三种类型土壤的大小,作图5。由图可知以中砂、粗砂为主的 $K_{fs}$ 最大,达1.98×10<sup>-4</sup> m s<sup>-1</sup>;以粉砂、细砂为主的土壤 $K_{fs}$ 为2.86×10<sup>-5</sup> m s<sup>-1</sup>;黏土 $K_{fs}$ 非常小, $K_{fs}$ 仅为9.99×10<sup>-7</sup> m s<sup>-1</sup>。结合Terzaghi和Peck [17] 对各种土壤 $K_{fs}$ 的计算结果可知,试验结果均在合理范围内,从而印证了Guelph入渗仪在该地区适用性良好。总之,黏土地区包气带土壤渗透性极差,地下水接受大气降水入渗补给能力很弱。因此,在研究区域降水入渗补给时,黏土区的补给量是极其有限的。

图6为四十里井盆地4个剖面 $K_{t}$ 随深度的变化

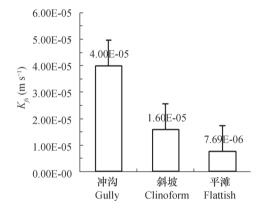


图3 不同地貌单元土壤渗透性比较

Fig. 3 Variation of  $K_{fs}$  with geomorphology

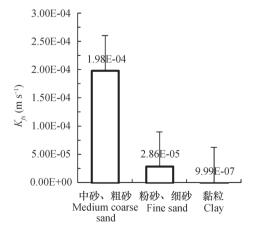


图5 不同土质类型土壤渗透性比较

Fig. 5 Variation of  $K_{fs}$  with soil type

情况。由图6可知,4个剖面 $K_6$ 随深度大都呈现先 减小后增大的趋势(CYD-02除外,但根据现场取 样观察,该试验点在潜水位附近土壤颗粒以中、粗 砂为主且颗粒分布均匀,其渗透性也有增大)。 从4个剖面 $K_f$ 。平均值来看,上游 $K_f$ 。较大,中下游较 小, 其中CYD-04最大,  $K_6$ 均值达3.48 ×  $10^{-4}$  m s<sup>-1</sup>, CYD-02最小,  $K_{\rm s}$ 均值仅为6.23×10<sup>-7</sup> m s<sup>-1</sup>。这说 明水动力条件是造成该区土壤渗透性的最主要外 界影响因素。CYD-04位于盆地上游,水动力条件 强,土壤颗粒也较粗; CYD-01~CYD-03位于盆 地中下游,水动力条件相对差,土壤颗粒较细。总 之,通过研究发现该区 $K_{t}$ 随深度大都呈现先减小 后增大的趋势,且 $K_{t}$ 在垂向上变化明显。因此, 在今后开展数值模拟等研究时必须考虑相关方面的 问题。但由于本次试验点较少,具体变化趋势及其 成因还有待进一步探讨,今后需进一步加深研究。

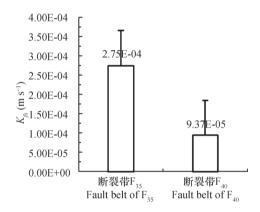


图4 不同构造影响带土壤渗透性比较

Fig. 4 Variation of  $K_{fs}$  with fault belt

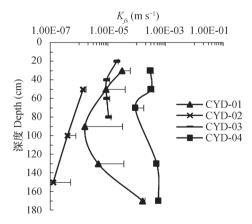


图6 不同试验点土壤渗透性随深度的变化

Fig. 6 Variation of  $K_{fs}$  with soil depth and location of experiment sites

变异系数是反映数据分布离散程度的重要 指标, 其划分等级一般为: <10%为弱变异; 10%~100%之间为中等变异; > 100%为强变异[18]。 冲沟、斜坡、平滩三个不同地貌类型,其 $K_{\epsilon}$ 的变 异系数分别为40.56%、37.02%、72.08%,均属中 等变异。三个不同地貌单元之间平均值之间的变异 系数为78.97%,也属中等变异。四十里井地区4个 剖面垂向上的变异系数分别为164.5%、104.4%、 43.81%、53.31%, CYD-01、CYD-02属于强变 异, CYD-03、CYD-04为中等变异, 4个剖面 $K_{6}$ 随 深度变化幅度均较大。新场、芨芨槽主要构造影响 带 $K_{ts}$ 的变异系数分别为103.5%、164.6%, 也属强 变异。由此可见,区内接受大气降水入渗补给的能 力差异性较大。这也从侧面反映出荒漠地区土壤类 型的多样性。因此,在荒漠地区开展土壤渗透性研 究工作时,应当充分考虑试验点的代表性,必要时 加大试验数目。

#### 2.2 土壤理化性质

四十里井盆地4个不同试验点的土壤理化性 质统计分析结果如表1。由表1可见,4个试验点 土壤质地差异性较大, CYD-01~CYD-03土壤以 粉砂、砂质粉土为主, CYD-04位于盆地上游, 以中粗砂、砂砾为主。土壤有机质含量均较小, 平均值在0.74~2.54 g kg-1之间,这是由于该区 处于极旱荒漠地区动植物较少。其中CYD-04明 显小于其余采样点,这可能与当地牧民活动以及 植被覆盖情况等有关。初始含水量盆地下游试验 点CYD-01、CYD-02较大,均值均大于13%; 盆地中上游试验点CYD-03、CYD-04较小,其 中CYD-04均值仅1.06%。4个试验点土壤均为碱 性,这主要与该地区降水量小、蒸发量大有关, 其中CYD-03、CYD-04 土壤pH明显大于CYD-01、CYD-02,这可能与土壤矿物成分、有机质 含量有关。土壤离子总量CYD-02最大, CYD-04最小,平均值仅为0.182%,离子总量含量盆 地上游明显小于中下游,说明由于地下水径流和 蒸发作用盐分在下游逐渐集聚。对于土壤容重, CYD-01~CYD-03差异不大,均值在1.36~1.39 g cm<sup>-3</sup>之间, CYD-04明显大于其他试验点, 平均 值为1.61 g cm<sup>-3</sup>, 这与几个试验点的土壤质地相 对应。

不均匀系数Cu和曲率系数Cc是反映土体级配的两个指标,4个试验点的Cu与Cc值均较大,

CYD-03的Cu与Cc平均值均最大,分别高达81.56 与10.47。根据相关研究成果, $K_{fs}$ 一般与Cu正相关,与 $C_c$ 负相关,因此其应与 $\sqrt{Cu/Cc}$  正相关,作4个试验点 $K_{fs}$ 与 $\sqrt{Cu/Cc}$  的关系图(如图7所示)。由图可知,总体而言 $K_{fs}$ 随 $\sqrt{Cu/Cc}$  的增大而增大,但二者并无明显的相关性。若将试验点分为黏土含量较少的试验点与砂质粉土试验点两类,在这两种类型土壤中 $K_{fs}$ 与 $\sqrt{Cu/Cc}$ 均成明显的正相关,这可能是由于该关系主要存在于土质类型相似的土壤中,对于土质类型差异较大的 $K_{fs}$ 还受其他因素如黏土矿物成分、交换阳离子、有机质含量等因素的影响,而受Cu与Cc影响减小造成的[19]。由于本次试验点较少,具体原因还有待进一步研究。

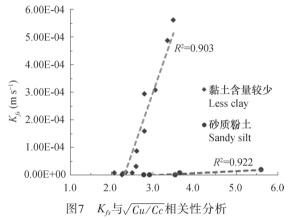


Fig. 7 Correlation analysis of  $K_{fs}$  and  $\sqrt{Cu/Cc}$ 

#### 2.3 土壤渗透性影响因素

由于土壤的理化性质可以分为若干因子,如: 容重、含水量、有机质含量、离子总量等,每种因 子可能均对土壤渗透性产生一定的影响,但这些因 素之间往往存在相互作用,从而导致分析时会出现 信息重叠现象,同时还可能存在量纲、累加时如何 确定权重系数等问题。因此,为查明影响土壤渗透 性的主导因素,本文采用因子分析方法分析各土 壤理化性质对渗透系数的影响。为深入分析各影 响因子对 $K_{\mathfrak{b}}$ 的贡献大小,本文以四十里井盆地4个 试验点为例,选取土壤pH、初始含水量、土壤容 重、有机质含量、土壤离子总量以及土壤的粒径分 布等6个影响因子。利用统计分析软件SPSS 19.0, 通过主成分分析方法,提取其主要成分,进行综 合分析。在分析前首先进行KMO(Kaiser-Meyer-Olkin)检验及Bartlett球形检验,经计算这6个因子 的KMO值为0.665,再由Bartlett球形检验知各变量

1 四十里井地区不同试验点的土壤理化性质统计分析

 Table 1
 Soil physical and chemical properties of the experiment sites in the Sishilijing basin

试验点	深度	1	有机质	含水量		容重	离子总量		土壤粒径分布			
Experiment	Depth	土壤质地	Organic matter	Water content	$^{\mathrm{hd}}$	Bulk density	Total ion content	Soil particl	Soil particle size distribution ( $\%$	on (%)	Cu	$C_{\mathcal{C}}$
site	( cm )	Soil texture	$(g kg^{-1})$	( % )		$(~g~cm^{-3})$	(%)	>0.5 mm	$0.5 \sim 0.1 \text{ mm}$	< 0.1 mm		
	30	粉砂Silt	1.58	8.99	7.41	1.36	1.219	2	47	51	32.67	3.78
	50	粉砂Silt	1.21	10.10	7.35	1.41	1.213	6	46	45	27.57	4.41
6 425	06	粉砂Silt	1.25	17.45	7.29	1.45	1.050	17	45	38	31.22	6.16
C1D-01	130	细砂Fine sand	0.86	8.02	7.77	1.36	0.101	14	29	19	14.79	2.85
	170	粉砂Silt	1.05	22.45	7.82	1.32	0.116	6	89	23	18.58	2.39
		平均值 Mean	1.19	13.40	7.68	1.38	0.740	10.20	54.60	35.20	24.97	3.92
	50	砂质粉上Sandy silt	1.09	96.6	7.67	1.32	2.005	0	32	89	34.58	2.77
CO	100	砂质粉土Sandy silt	3.73	20.87	7.89	1.37	1.748	1	18	81	9.76	1.15
C1D-02	150	砂质粉土Sandy silt	2.80	21.84	7.31	1.40	1.226	1	17	82	7.59	0.98
		平均值 Mean	2.54	17.56	7.62	1.36	1.660	0.67	22.33	77.00	17.31	1.63
	20	砂质粉土Sandy silt	2.20	5.85	7.69	1.28	2.007	6	32	59	68.27	1.81
	40	砂质粉土Sandy silt	2.22	6.18	7.67	1.41	1.788	∞	31	61	49.85	2.57
CYD-03	09	粉砂Silt	2.48	8.82	8.49	1.38	1.234	14	51	35	100.0	17.02
	80	粉砂Silt	1.40	4.54	8.53	1.49	1.019	15	52	33	108.1	20.46
		平均值 Mean	2.08	6.35	8.10	1.39	1.512	11.50	41.50	47.00	81.56	10.47
	30	中砂Medium sand	1.14	1.88	9.17	1.68	0.233	35	43	22	78.00	11.23
	50	砾砂Gravel sand	0.54	0.83	8.55	1.48	0.183	09	34	9	6.70	0.72
70 A	70	中砂Medium sand	1.26	0.69	9.29	1.78	0.232	42	49	6	5.39	0.79
C1D-04	130	粗砂Coarse sand	0.46	0.83	9.51	1.65	0.104	59	40	3	5.96	0.67
	170	砾砂Gravel sand	0.32	1.05	9.40	1.46	0.157	08	19	1	7.79	0.64
		平均值 Mean	0.74	1.06	9 18	1 61	0 182	55.20	37.00	8 20	77 00	2.81

http://pedologica.issas.ac.cn

不是相互独立的,故该方法的适用性较好。为了使 主成分载荷矩阵中系数更加显著,在主成分分析的 过程中进行了旋转,采用的旋转方法为最大方差 法,因子抽取的阈值为0.6。主成分负荷矩阵表如 表2所示。

由表2可知,影响该区土壤入渗的因子可以简

#### 表2 主成分负荷矩阵表

Table 2 Principal component loading matrix

主成分	рН	含水量 Water content	容重 Bulk density	有机质 Organic matte	离子总量 Total ion content -	土壤粒径分布 Soil paricle size disribution (%)		
Principal						>0.5 mm	0.5 ~ 0.1 mm	< 0.1 mm
F1	-0.498	0.733	-0.187	0.837	0.459	-0.776	0.002	0.706
F2	0.806	-0.406	0.916	-0.086	-0.536	0.561	-0.051	-0.478
F3	0.018	-0.107	-0.092	0.443	0.590	0.057	-0.949	0.490

化为3个:第一主成分为土壤疏松度综合指标,主要由初始含水量、有机质含量及土壤粒径分布组成,其中初始含水量、有机质含量以及粒径 < 0.1 mm的颗粒与 $K_f$ 。呈正相关,而粒径 > 0.5 mm的颗粒含量与 $K_f$ 。的关系为负相关。第二主成分为土壤基本物理化学性质综合指标,主要由土壤pH、土壤容重、离子总量以及粒径 > 0.5 mm颗粒组成,除离子总量与 $K_f$ 。负相关外,其余3个因子均与 $K_f$ 。呈正相关。第三主成分主要为土壤粒径成分指标,主要为粒径0.5 ~ 0.1 mm颗粒,其与 $K_f$ 。呈负相关。

总之, 若以每个主成分荷载值大于0.5为标 准,可知>0.5 mm的粗砂及<0.1 mm的极细砂、 粉粒及黏粒含量对 $K_{ts}$ 的影响最大,而 $0.5 \sim 0.1$  mm 的中砂、细砂中砂含量对 $K_{t}$ 的影响最小。这与前 人在其他地区得出的结论存在一定的差异, 如姚 淑霞等<sup>[20]</sup>研究表明影响科尔沁沙地K<sub>fs</sub>的主要因素 是土壤有机质含量,其次为粗砂、细砂和黏粉粒 含量,而土壤容重对 $K_t$ 的影响相对较小;席海洋 等[21]研究表明额济纳绿洲黏粒质量分数因子土壤  $K_{\epsilon}$ 的影响最大,土壤中阴阳离子总量因子和容重 因子对 $K_{f}$ 的影响最小;李效良等<sup>[22]</sup>研究指出西南 喀斯特地区影响原状土饱和导水率的主要因素为土 壤质地和土壤孔性, 而土壤孔性是影响扰动土壤 导水率的主导因素。由此可见,对于 $K_{fr}$ 的影响因 素,不同地区,由于其土壤理化性质、植被覆盖等 因素不同, 其结果也存在较大的差异。因此, 研究 某地区土壤渗透性时应根据相应试验进行具体分 析。再者,由于本次试验数目有限,若要彻底查清 该区土壤渗透性与土壤理化性质的关系,还需进一

步研究。

主成分贡献率结果如表3所示,由表可知,第一主成分的特征值为2.832,贡献率达35.4%,高于其他主成分,这说明土壤疏松度对于土壤渗透性影响程度最大。三个主成分的累计贡献率为87.9%,大于85%,说明以这3个因子解释整体 $K_{fs}$ 的变化情况是合理的。

#### 表3 主成分贡献率

 Table 3
 Contribution percentages of the principal components

主成分	特征值	贡献率	累积贡献率
Principal	Eigenvalue	% of variance	Cumulative (%)
F1	2.832	35.40	35.40
F2	2.494	31.18	66.57
F3	1.708	21.35	87.92

#### 3 结 论

本文综合采用双环渗水试验和 Guelph入渗试验两种原位渗水试验方法研究新场—向阳山预选地段的土壤渗透性特征,并运用主成分分析法初步查明了新场向阳山地段包气带土壤的渗透性的主要影响因素,获得了新场向阳山地段包气带土壤的渗透参数,基本查明了该预选地段包气带土壤的渗透特征及其影响因素。获得的主要结论和认识为:(1)区内包气带土壤 $K_{fs}$ 差异较大。双环渗水试验结果表明不同地貌单元 $K_{fs}$ 大小为沟谷地带>缓坡地带>平滩地带,其均值分别为4.0×10<sup>-5</sup> m s<sup>-1</sup>、1.6×10<sup>-5</sup> m s<sup>-1</sup>、7.69×10<sup>-6</sup> m s<sup>-1</sup>。因此,沟谷地

带为区内大气降水入渗最重要的补给区。(2)构

造影响带 $K_{fs}$ 很大,且不同构造影响带 $K_{fs}$ 存在一定的差异。Guelph人渗试验结果显示新场地区构造影响带 > 芨芨槽构造影响带,其平均值分别高达2.75 ×  $10^{-4}$  m s<sup>-1</sup>、9.37 ×  $10^{-5}$  m s<sup>-1</sup>。(3)研究区包气带土壤渗透性的最主要影响因素是粗砂及黏粉粒(粒径 > 0.5 mm的颗粒与粒径 < 0.1 mm的颗粒)含量,而中砂含量(粒径在0.5 ~ 0.1 mm内)影响最小。

#### 参考文献

- [1] 潘自强,钱七虎. 高放废物地质处置战略研究. 北京: 原子能出版社, 2009: 3-4. Pan Z Q, Qian Q H. Strategic research for high-level radioactive waste geological disposal (In Chinese). Beijing: Atomic Energy Press, 2009: 3-4
- [2] 王驹, 范显华, 徐国庆, 等. 中国高放废物地质处置十年进展. 北京: 原子能出版社, 2004: 1—27. Wang J, Fan X H, Xu G Q, et al. Geological disposal of high level radioactive waste in China: Progress in the last decade (In Chinese). Beijing: Atomic Energy Press, 2004: 1—27
- [3] 王驹,陈伟明,苏锐,等.高放废物地质处置及其若干关键科学问题.岩石力学与工程学报,2006,25(4):801—812. Wang J, Chen W M, Su R, et al. Geological disposal of high-level radioactive waste and its key scientific issues (In Chinese). Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(4):801—812
- [4] Wang J, Xue W M, Zheng H L, et al. Preliminary site characterization at beishan, northwest china-a potential site for china's high-level radioactive waste repository//Witherspoon P A, Bodvarsson G S. Geological challenges in radioactive waste isolation:

  Third worldwide review. USA: University of California Berkeley, 2001: 77—84
- [5] IAEA. Hydrogeological investigation of sites for the geological disposal of radioactive waste// International Atomic Energy Agency. Technical reports series, ISSN0074-1914; No.391.Vienna; IAEA, 1998
- [6] 郭永海,刘淑芬,吕川河.高放废物处置系统地下水同位素特征.地球学报,2003,24(6):525—528. Guo Y H, Liu S F, Lü C H. Isotope characteristics of groundwater in the potential site of a high-level waste repository in China (In Chinese). Acta Geoscientica Sinica, 2003, 24(6):525—528
- [7] 郭永海,王驹,萧丰,等.高放废物处置库北山预选区 地下水同位素组成特征及其意义.地球学报,2008,

- 29 (6): 735—739. Guo Y H, Wang J, Xiao F, et al. Groundwater isotope characteristics of the pre-selected site of a high level radioactive waste repository in the Beishan area, Gansu Province and their implications (In Chinese). Acta Geoscientica Sinica, 2008, 29 (6): 735—739
- [8] 郭永海, 王海龙, 董建楠, 等. 高放废物处置库芨芨槽预选场址深部地下水同位素研究. 地质学报, 2013, 87 (9): 1477—1488. Guo Y H, Wang H L, Dong J N, et al. Isotopic study of deep groundwater in Jijicao preselected site for China's high level radioactive waste disposal repository (In Chinese). Acta Geologica Sinica, 2013, 87 (9): 1477—1488
- [9] 樊军, 邵明安, 王全九. 田间测定土壤导水率的方法研究进展. 中国水土保持科学, 2006, 4(2): 114—119. Fan J, Shao M A, Wang Q J. Development about methods of soil hydraulic conductivity determination in fields (In Chinese). Science of Soil and Water Conservation, 2006, 4(2): 114—119
- [10] Reynolds W, Elrick D, Topp G. A reexamination of the constant head well permeameter method for measuring saturated hydraulic conductivity above the water-table. Soil Science, 1983, 136: 250—268
- [11] Reynolds W, Elrick D. In situ measurement of field-saturated hydraulic conductivity, sorptivity, and the alpha-parameter using the guelph permeameter. Soil Science, 1985, 140: 292—302
- [12] 王红兰,宋松柏,唐翔宇.基于 Guelph 法的土壤饱和导水率测定方法对比.农业工程学报,2012,28 (24):99—104. Wang H L, Song S B, Tang X Y. Comparison of determination methods for saturated soil hydraulic conductivity with Guelph infiltrometer (In Chinese). Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28 (24):99—104
- [13] 闵雷雷,于静洁,张广英,等.三种方法测估的林 地稳渗率对比初探.南水北调与水利科技,2010, 50(8):36—38. Min L L, Yu J J, Zhang G Y, et al. Preliminary comparison of steady infiltration rate in woodland by the three methods (In Chinese). South to North Water Transfers and Water Science and Technology, 2010, 50(8): 36—38
- [14] 伍靖伟,杨金忠. 圭夫仪与双套环测定土壤饱和渗透系数的试验比较.灌溉排水学报,2003,22(2):44—47. Wu J W, Yang J Z. The experimental comparison of Guelph permeameter and double ring infiltrometer on measuring saturated soil hydraulic conductivity (In Chinese). Journal of Irrigation and Drainage, 2003, 22(2):44—47
- [15] 于东升, 史学正. 用Guelph法研究南方低丘缓坡地不

- 同坡位土壤渗透性. 水土保持通报, 2002, 22 (1): 6—9. Yu D S, Shi X Z. Soil perme-ability at different position of upland measured by Guelph method in hilly area of South China (In Chinese). Bulletin of Soil and Water Conservation, 2002, 22 (1): 6—9
- [16] 赵景波, 马延东, 邢闪, 等. 腾格里沙漠宁夏回族自治区中卫市沙层水分人渗研究. 水土保持通报, 2011, 31 (3): 12—16. Zhao J B, Ma Y D, Xing S, et al. Sand layer water permeability of Tengger desert in Zhongwei city, Ningxia Hui Autonomous Region (In Chinese). Bulletin of Soil and Water Conservation, 2011, 31 (3): 12—16
- [17] Terzaghi K, Peck R B, Mesri G. Soil Mechanics in Engineering Practice. 3rd edition. Canada: Wiley, 1996; 71—81
- [18] 雷志栋,杨诗秀.土壤特性空间变异性初步研究.水利学报,1985,9:10-21.Lei Z D, Yang S X. Preliminary investigation of the spatial variability of soil properties (In Chinese). Journal of Hydraulic Engineering, 1985,9:10-21
- [19] 陈明珠,阎长虹,王玉英,等. 土体渗透性影响因素——以普定陈旗堡为例. 水文地质工程地质, 2008 (4): 66—70. Chen M Z, Yan C H, Wang Y Y, et al. The influence facters of soil permeability in

- Chenqibao village of Puding County (In Chinese) . Hydrogeology and Engineering Geology, 2008(4): 66-70
- [20] 姚淑霞,赵传成,张铜会.科尔沁不同沙地土壤饱和导水率比较研究.土壤学报,2013,50(3):469—477. Yao S X, Zhao C C, Zhang T H. A comparison of soil saturated hydraulic conductivity (K<sub>fs</sub>) in different Horqin Sand Land (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2013,50(3):469—477
- [21] 席海洋,冯起,程玉菲,等。额济纳绿洲土壤人渗特征与土壤状况的关系研究。冰川冻土,2008,30(6):976—982. Xi H Y, Feng Q, Cheng Y F, et al. Permeability characteristics of soil and their dependence on soil conditions in Ejina oasis (In Chinese). Journal of Glaciology and Geocryology, 2008, 30(6):976—982
- [22] 李孝良, 陈效民, 周炼川, 等. 西南喀斯特地区土壤饱和导水率及其影响因素研究. 灌溉排水学报, 2008, 27 (5): 74—86. Li X L, Chen X M, Zhou L C, et al. Soil saturated hydraulic conductivity and its influential factors in southwest karst region of China (In Chinese). Journal of Irrigation and Drainage, 2008, 27 (5): 74—86

# SOIL PERMEABILITY OF AERATION ZONE IN XINCHANG-XIANGYANGSHAN - A PRESELECTED SITE FOR HIGH LEVEL RADIOACTIVE WASTE DISPOSAL

Li Jiebiao Su Rui Zhou Zhichao Guo Yonghai Ji Ruili Zhang Ming

(CNNC Key Laboratory on Geological Disposal of High-level Radioactive Waste, Beijing Research Institute of Uranium Geology,

Beijing 100029, China)

Abstract In selecting and evaluating a new dump site for disposal of high-level radioactive waste (HLW) repository, its hydrogeology condition is one of the most important factors. Moreover, soil permeability of the aeration zone is one of the key issues in the study of hydrogeology, affecting water infiltration, runoff and evapotranspiration in the surface soil layer and their distribution relations. Analysis of soil permeability of the aeration zone helps understand the mechanism of groundwater formation. Beishan in Gansu Province is a preselected priority region for disposal of China's HLW, while Xinchang-Xiangyangshan is a preselected priority site. For that end, investigations were carried out on soil permeability of the aeration zone in that preselected site, using the double ring method and and a Guelph infiltration meter in-situ. With the aid of software SPSS 19.0, soil organic matter, initial soil water content, soil pH, soil bulk density, soil total ion content and soil particle size distribution were selected as 6 main affecting factors for principal component analysis. This project was aimed at acquiring data for in-depth study on characteristics of soil water movement and formation and circulation of groundwater in the area, so as to provide some scientific basis for site determination and performance evaluation of the preselected area. The following knowledge and

results were obtained; (1) horizontal distribution of permeability coefficients of the soil aeration zone of Xinchang-Xiangyangsan was characterized by ① soil permeability varied sharply with the location; ② in terms of soil saturated hydraulic conductivity ( $K_{fs}$ ), various geomorphic units followed an order of gully  $(4 \times 10^{-5} \text{ m s}^{-1}) > \text{slow slope } (1.6 \times 10^{-5} \text{ m s}^{-1}) > \text{flat land } (7.69 \times 10^{-6} \text{ m s}^{-1})$ . Therefore, it could be inferred that gullies are the main area where rainwater infiltrates and permeates into deep soil to form groundwater, and an area that should be crossed out from the list of candidates of HLW dump sites, because of its active groundwater; 3  $K_{fs}$  is higher at the Xinchang fault belt than at the Jijicao fault belt, being on average  $2.75 \times 10^{-4}$  m s<sup>-1</sup> and  $9.37 \times 10^{-5}$  m s<sup>-1</sup>, respectively. So large-scaled fault belts should also be crossed out from the list due to its highly active groundwater;  $\bigoplus K_{fs}$  in clay is very low, being on average only  $9.99 \times 10^{-7}$  m s<sup>-1</sup>. (2) Soil permeability also varied vertically, with  $K_{fs}$  rising first and declining later down the soil in depth at the four experimental points in the Sishilijing Basin. As the number of soil samples was limited, causes and trend of the change need to be further explored. (3) Analysis of factors affecting  $K_{li}$ and its mechanism shows that  $K_{fi}$  is closely related to soil physical and chemical properties, and the principal component analysis indicates that  $K_{fs}$  affecting factors may be summarized as follows: the first principal component may be described as soil looseness, which is affected mainly by initial soil water content, organic matter content and soil particle size composition; the second one is basic physical and chemical properties, mainly including soil pH, soil total ion content, soil bulk density and soil particle size (>0.5 mm) composition; and the third one is soil particle size composition, mainly of the particles ranging from 0.1mm to 0.5 mm in size. In a word, among all the affecting factors, the contents of moderate-coarse sands ( >0.5mm) and clayer silts ( < 0.1 mm) are the highest in effect affecting  $K_{fs}$ , while the content of medium-fine sands ( $0.1 \sim 0.5 \text{ mm}$ ) is the lowest.

**Key words** Soil permeability; Xinchang-Xiangyangshan preselected site; High level radioactive waste disposal

(责任编辑: 汪枞生)

# ACTA PEDOLOGICA SINICA Vol. 52 No. 6 Nov., 2015

### CONTENTS

Reviews and Comments
Problems and analytical logic in building cultivated land productivity evaluation index system
Advancement in study on effect of earthworm on greenhouse gas emission in soil and its mechanism
Lu Mingzhu, Lü Xianguo, Guan Qiang, et al. (1224)
Research Articles
Vertical distributions of soil organic and inorganic carbon and their controls along toposequences in an alpine
region
Effect of grain size on and correlation analysis of pedodiversity and surface water body diversity in counties
typical of Central and East China ················· Ren Yuanyuan, Zhang Xuelei (1249)
Spatial-temporal variability of soil readily available nutrients in cultivated land of Weibei Tableland Area
Yu Yang, Zhao Yeting, Chang Qingrui (1260)
Hyperspectral estimation and remote sensing retrieval of soil water regime in the Yellow River Delta
Effect of wet-dry alternation on loess disintegration rate Wang Jian, Ma Fan, Zhang Penghui, et al. (1271)
Experiment and simulation of infiltration from layered soils in open pit mine in Jin-Shaan-Meng adjacent region
Wu Qifan, Fan Jun, Yang Xiaoli, et al. (1289)
Anaerobic redox of iron oxides and photosynthetic oxidation of ferrous iron in upland cinnamon soils
Sun Lirong, Wang Xugang, Xu Xiaofeng, et al. (1299)
Study on effect of kaolinite colloids on zeta potential of Al oxide coated quartz with streaming potential method
Li Zhongyi, Xu Renkou (1309)
Nitrogen use efficiencies of major grain crops in China in recent 10 years Yu Fei, Shi Weiming (1324)
Changes of soil nutrients and supply capacities in the piedmont plain of Taihang Mountain during the period
of 1978–2008Liu Jianling, Jia Ke, Liao Wenhua, et al. (1334)
Spatial variation of ecological stoichiometry of soil C, N and P in a small hilly watershed in subtropics of
Spatial variation of ecological stoichiometry of soil C, N and P in a small hilly watershed in subtropics of China
Li Honglin, Gong Lu, Zhu Meiling, et al. (1354)
Distribution of soil selenium in the Northeast China Plain and its influencing factors
Dai Huimin, Gong Chuandong, Dong Bei, et al. (1364)
Study on phytolith-occluded organic carbon in soil of subtropical forest of southern Zhejiang
Lin Weilei, Ying Yuqi, Jiang Peikun, et al. (1372)
Toxic effect of multiple-time overlying pollution of Phe in soil on Eisenia fetida
Effect of organic manure on cucumber Fusarium wilt control and its mechanism
Zhao Liya, Li Wenqing, Tang Longxiang, et al. (1390)
Ameliorative effect of cropping <i>Lycium barbarum</i> L. with drip irrigation on soil enzymes activities in takyric
solonetz
Change in shallow soil temperature and its response to change in air temperature in middle and lower reaches
of Shiyang River Basin
Soil permeability of aeration zone in Xinchang-Xiangyangshan - a preselected site for high level radioactive
waste disposal······ Li Jiebiao, Su Rui, Zhou Zhichao, et al. (1420)
Research Notes
Inversion of spatial pattern of organic matter contents in black soil based on TM data
Analysis of soil fertility and fertilizer efficiency of maize field in Shaanxi
Shan Yan, Li Shuili, Li Ru, et al. (1437)
Application of cosmic-ray method to soil moisture measurement of grassland in the Loess Plateau
Zhao Chun, Yuan Guofu, Liu Xiao, et al. (1444)
Cover Picture: Reclamation of a highly saline-sodic wasteland of takyric solonetz while cropping Lycium barbarum
L. with drip irrigation (by Zhang Tibin)

# 《土壤学报》编辑委员会

主 编: 史学正

执行编委:(按姓氏笔画为序)

丁维新 巨晓棠 王敬国 干朝辉 宇万太 朱永官 李永涛 李芳柏 李保国 航 吴金水 沈其荣 张玉龙 张甘霖 张福锁 陈德明 邵明安 杨劲松 杨明义 杨林章 林先贵 依艳丽 周东美 周健民 金继运 逄焕成 施卫明 骆永明 赵小敏 贾仲君 徐国华 徐明岗 徐建明 崔中利 常志州 黄巧云 章明奎 蒋 新 彭新华

窦 森 廖宗文 蔡祖聪 蔡崇法 潘根兴 魏朝富

编辑部主任: 陈德明

责任编辑: 汪枞生 卢 萍 檀满枝

#### 土 壤 学 报

#### Turang Xuebao

(双月刊, 1948年创刊) 第52 卷 第6期 2015年11月

#### **ACTA PEDOLOGICA SINICA**

(Bimonthly, Started in 1948) Vol. 52 No. 6 Nov., 2015

编	辑	《土壤学报》编辑委员会	Edited	
		地址:南京市北京东路71号 邮政编码:210008		
		电话:025-86881237		
		E-mail: actapedo@ issas. ac. cn		

主 编史学正 主 管中国科学

主 办中国土壤学会

承 办 中国科学院南京土壤研究所

出版科学出版社

地址:北京东黄城根北街16号邮政编码:100717

印刷装订 北京中科印刷有限公司总 发 行 斜 섛 出 版 社

地址:北京东黄城根北街16号邮政编码:100717

电话:010-64017032

E-mail: journal@ mail. sciencep. com

国外发行 中国国际图书贸易总公司 地址:北京399信箱 邮政编码:100044

Edited by Editorial Board of Acta Pedologica Sinica

Add: 71 East Beijing Road, Nanjing 210008, China

Tel: 025 - 86881237

E-mail: actapedo@ issas. ac. cn

Editor-in-Chief Shi Xuezheng

Superintended by Chinese Academy of Sciences Sponsored by Soil Science Society of China

Undertaken by Institute of Soil Science,
Chinese Academy of Sciences

Published by Science Press

Add: 16 Donghuangchenggen North Street,

Beijing 100717, China

Printed by Beijing Zhongke Printing Limited Company

Distributed by Science Press

Add: 16 Donghuangchenggen North Street,

Beijing 100717, China

Tel: 010 - 64017032

E-mail: journal@ mail. sciencep. com

China International Book Trading Corporation

Add: P. O. Box 399, Beijing 100044, China

国内统一刊号: CN 32-1119/P

国内邮发代号: 2-560

国外发行代号:BM45

定价: 60.00元

国内外公开发行

Foreign

ISSN 0564-3929

