

粉煤灰充填复垦土壤可溶性钾的迁移 与浓度变化趋势

王芳,陈孝杨*,檀海洋,于佳禾,刘英
(安徽理工大学地球与环境学院,安徽淮南232001)

摘要:应用土柱试验和HYDRUS-1D软件模拟,研究粉煤灰充填复垦土壤可溶性钾初期迁移特征和长期浓度变化趋势。结果表明,复垦初期若有田间灌溉行为或降雨量较大,绝大部分土壤可溶性钾在10 d左右均会随着土壤水分入渗迅速迁移至下层土壤或地下水,土壤可溶性钾流失严重,粉煤灰中高富集的钾往往不能为植物利用。地下水位对复垦土壤可溶性钾质量浓度长期变化有重要影响。地下水位较高(-115 cm)时,若降雨量少、蒸发量大,上覆土壤可溶性钾浓度升高,植物养分利用机会增加,但相应地上覆土壤盐分和重金属等污染的风险也会增加。

关键词:粉煤灰;复垦土壤;可溶性钾;土柱试验;HYDRUS-1D

中图分类号: X88 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-3268(2015)03-0059-06

Soluble Potassium Transport and Concentration Change in Reclaimed Soil Filled with Fly Ash

WANG Fang, CHEN Xiaoyang*, TAN Haiyang, YU Jiahe, LIU Ying
(School of Earth and Environment, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

Abstract: The early transport characteristics and long-term concentration tendency of soil soluble potassium were studied in reclaimed soil profiles filled with fly ash, based on soil column experiment and HYDRUS-1D program. The results showed that the vast majority of soluble potassium in reclaimed soil could rapidly transport together with moisture infiltration to the underlying soil layers or groundwater within 10 days if there was field irrigation or heavy rainfall in the beginning of the reclamation, soil potassium loss was serious, and high enrichment potassium in fly ash could not be utilized for plants. Groundwater table in the reclamation soil profiles had a major impact on long-term process of soluble potassium concentration. Potassium concentration in the soil solution would increase under the condition of high groundwater table(-115 cm), little precipitation and much evaporation. At the same time, the plants could better make use of potassium nutrient, but the contamination risk of coversoil from salinity and heavy metals also increased correspondingly.

Key words: fly ash; reclaimed soil; soluble potassium; soil column experiment; HYDRUS-1D

煤炭作为世界上重要的能源供体,燃烧发电仍然是其主要的利用形式。但是燃煤电厂排放大量的煤燃烧残余物,如粉煤灰、底灰、矿渣、流化床燃烧灰

和其他的固体颗粒^[1],尤其是粉煤灰的排放量巨大。粉煤灰是高度分散的微粒集合体。尽管煤炭的类型和燃烧工艺对粉煤灰的理化性质产生显著影

收稿日期:2014-09-01
基金项目:国家自然科学基金项目(51274013);安徽理工大学引进人才基金项目(2013009);安徽理工大学中青年学术骨干基金项目(2012003)
作者简介:王芳(1990-),女,安徽宿州人,在读硕士研究生,研究方向:矿区生态环境修复。E-mail: 1539603085@qq.com
* 通讯作者:陈孝杨(1976-),男,安徽肥西人,副教授,博士,主要从事矿区土壤质量与生态环境修复研究。
E-mail: xyangchen_aust@126.com

响,但几乎所有的粉煤灰都是由硅、铝与不定型碳、铁、钙、镁、钾、钠、硫等元素组成,尤其是植物生长必需养分钾,其含量丰富。粉煤灰的优势颗粒是粉粒,容重低。因此,粉煤灰在工业和农业领域有广泛的利用前景。用粉煤灰作为添加剂生产水泥和混凝土是一种有效的、经济的、生态的利用方式^[2]。同时由于粉煤灰中含有大量植物生长所必需的微量元素,常被用来作为农业土壤的改良剂^[3-6],其不仅能够改善土壤的微团粒结构,而且能够改变土壤养分和化学元素组成以促进植物生长。尽管如此,上述方式利用的粉煤灰量极其有限。许多国家的粉煤灰排放量很高,常结合煤矿塌陷区的综合治理,利用粉煤灰作为基质充填重构农业土壤剖面,或者直接在粉煤灰场上部覆土进行植物栽培。目前,有关粉煤灰充填复垦土壤重金属污染评价^[7-9]、土壤理化性质及其时空变异^[10-12]、土壤水分垂直运移特征^[13]等领域的研究较多,而未见关于粉煤灰充填复垦土壤可溶性钾迁移及浓度变化的报道。为此,采用土柱试验,研究粉煤灰充填复垦土壤中可溶性钾的初期迁移规律,并根据多年气象资料,应用 HYDRUS-1D 软件对可溶性钾的长期浓度变化进行模拟,以期粉煤灰充填复垦土壤田间养分管理提供理论依据和技术支持。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

研究区位于安徽省淮南市上窑镇,为粉煤灰场直接覆土复垦作农业用地。淮南市地处淮河中游,安徽省中北部,属大陆性暖温带半湿润季风气候,气候表现温和,年均降雨量为 915 mm,年均蒸发量为 790.1 mm。研究区 2001 年复垦作为农业用地,轮种小麦和黄豆。复垦地表土厚度不均匀,介于 25~50 cm,平均为 35 cm,表土质地为壤土,容重为 1.45 g/cm^3 。充填的粉煤灰厚度在 260~400 cm,平均为 350 cm。粉煤灰以粉粒为主(约占 80%),少有黏粒和细砂,容重为 0.88 g/cm^3 。

1.2 土柱设计及土柱试验

实验室进行土柱设计(图 1a)与土柱试验时,基本按照研究区的实际情况来确定初始参数。土柱试验采用德国 UGT 公司研制的土壤水盐运动监测系统。整个试验系统分为 4 个部分:土柱(高 176 cm、直径 30 cm 的圆柱)、传感器系统、数据记录仪和计算机处理系统,土柱底端装有粗孔渗透性膜并连接地下水控制装置(图 1b)。土柱试验所用的上覆土壤为砂壤土,厚度为 35 cm,初始含水量为

$0.1169 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$,容重为 1.45 g/cm^3 ;下层粉煤灰厚度为 96 cm,初始含水量为 $0.0884 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$,容重为 0.88 g/cm^3 。整个土柱设置 5 个深度不同的监测断面,分别为 5、34、64、94、123 cm(地下水位较高时仅有 4 个不同深度监测断面,分别为 5、34、64、94 cm),每个断面放置时域反射计(TDR)以监测土壤含水量,同时放入吸针以抽取土壤溶液,测定可溶性钾质量浓度。试验设计 4 个重复土柱。

整个土柱试验分为 3 个阶段。第 1 阶段,在土柱底部安装吸力泵,给定吸力 200 hPa,模拟地下水位在 -300 cm 以下(低地下水位)。同时在土柱上端用蒸馏水灌溉,灌溉量 20 mm/d,直至上覆土壤和粉煤灰层的含水量接近各自的田间含水量($0.4322 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 和 $0.5180 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$)。第 2 阶段,用 200 mg/L 的 KCl 溶液连续灌溉 6 d,此后用蒸馏水灌溉,灌溉量 20 mm/d,每天通过吸针在各监测断面抽取土壤溶液。试验持续 16 d 后,用蒸馏水清洗土柱。第 3 阶段,移去吸力泵,底端连接地下水控制装置,设定地下水位为 -115 cm(高地下水位)。其余试验过程与方法和第 2 阶段相同。在整个试验过程中,TDR 保持连续工作,每小时记录一组数据以监测上覆土壤和粉煤灰层的含水量。

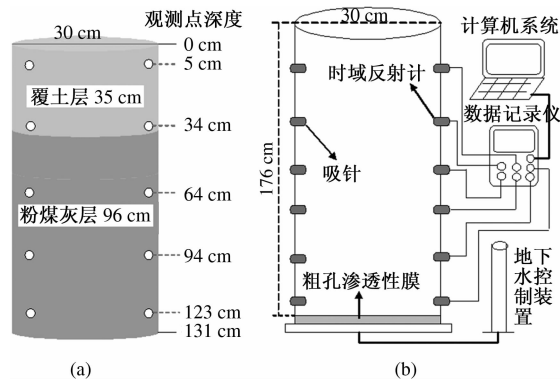


图 1 土柱设计与试验系统装置

1.3 持水曲线的拟合

将土壤(粉煤灰)样品放入 100 cm^3 的环刀内,按照容重为 1.45 g/cm^3 (0.88 g/cm^3) 进行分层压实。然后将样品放置在铺有滤纸的水槽中,水位控制在环刀底部,使得水分在毛管力的作用下通过滤纸缓慢进入土壤(粉煤灰),直至达到饱和状态。然后根据不同的基质吸力要求进行样品脱水试验。试验中的基质势用 pF 值表示,pF 值为土壤基质势绝对值的常用对数。pF 值为 1.0、1.8、2.5 时,用吸力平板仪进行脱水试验;pF 值为 4.2 时,用压力膜仪进行脱水试验。持水曲线应用 van Genuchten 的经验模型进行拟合(公式 1)^[14]。

$$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) / [1 + |\alpha h|^n]^m \tag{1}$$

式中, θ 为含水量, cm^3/cm^3 ; θ_s 为饱和含水量, cm^3/cm^3 ; θ_r 为残余含水量, cm^3/cm^3 ; h 为基质势, hPa; m 、 n 、 α 为持水曲线的形态参数 ($m = 1 - 1/n$), 无量纲。

1.4 钾吸附等温线的拟合

用 0.002 mol/L CaCl_2 标准溶液配制不同质量浓度的 KCl 溶液,使得溶液中的钾质量浓度分别为 0、10、20、30、40、50、60、70、80、90、100 mg/L。分别称取 10 g(精确至 0.01 g)土壤(粉煤灰)放入 11 个容量为 100 mL 的 PVC 瓶中,然后再分别量取 50 mL 不同质量浓度的 KCl 溶液放入上述 11 个 PVC 瓶中,振荡 3 h,然后过滤,用火焰分光光度计(EIEA6361,德国 Eppendorf 公司)测定溶液中的钾质量浓度,拟合钾的吸附等温线,并计算钾的交换系数(K_d)。

1.5 可溶性钾迁移的数学模型

对流—弥散方程(公式 2)通常被用来描述土壤溶质的一维垂直运移特征。有关专家学者研究发现,其无论是在实验室土柱试验,还是在田间小区试验中均有很好的应用效果^[15-16]。本研究应用对流—弥散方程来模拟可溶性钾在复垦土壤剖面中的初期迁移和长期质量浓度变化特征,并控制相应的初始条件和上、下边界条件。

$$\frac{\partial \theta C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\theta D \frac{\partial C}{\partial z} \right) - \frac{\partial v \theta C}{\partial z} \tag{2}$$

表 1 淮南市 2003—2004 年月降雨量和蒸发量 mm

年份	项目	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月
2003	降雨量	17	51	82	72	38	163	308	154	60	85	55	15
	蒸发量	21 *	29.2 *	51.4 *	71 *	83	104	78	80	78	2	38.2 *	25.6 *
2004	降雨量	36	8	41	9	42	170	77	112	66	3	35	24
	蒸发量	21 *	29.2 *	51.4 *	71 *	88	88	123	98	92	6	38.2 *	25.6 *

注: * 为多年平均值。资料来源于安徽省淮南市气象局。

2 结果与分析

2.1 砂壤土和粉煤灰的持水曲线

依据 van Genuchten 模型得到砂壤土和粉煤灰的持水曲线(图 2)。当砂壤土和粉煤灰的容重分别为 1.45 g/cm³、0.88 g/cm³ 时,由于质地差异,粉煤灰的田间持水量(pF 值等于 1.8 时的含水量)与饱和含水量(pF 值等于 0 时的含水量)均高于砂壤土,而它们的永久凋萎点(pF 值等于 4.2 时的含水量)基本上都在 0.05 ~ 0.08 cm³/cm³。同时,当基质势大于 -100 hPa 时,粉煤灰的含水量容易达到很高水平,在 0.50 cm³/cm³ 以上,并接近饱和含水量

式中, C 为溶质的质量浓度,mg/L; θ 为含水量, cm^3/cm^3 ; t 为时间, d; z 为垂直坐标(向下为正方向), cm; v 为平均孔隙水运动速率, cm/d; D 为弥散系数, cm^2/d 。上边界条件为给定灌溉量条件下的水分和溶质通量。下边界条件根据地下水位的不同来设定,当地下水位较低时为自由排水,地下水位较高时为恒定含水量,即粉煤灰的饱和含水量。砂壤土和粉煤灰含水量的初始条件为各自的田间含水量,钾质量浓度初始条件在不同试验阶段依据监测结果来输入。

1.6 可溶性钾质量浓度长期变化趋势模拟

查阅安徽省淮南市 2001—2010 年的气象资料,年降雨量和蒸发量数据变化不大,仅 2003 年相对湿润,年降雨量 1 100 mm,年蒸发量 661.4 mm;2004 年相对干旱,年降雨量 623 mm,年蒸发量 731.4 mm(表 1)。因此,以 2003 年和 2004 年的降雨量和蒸发量数据为依据,应用 HYDRUS-1D 软件采用对流—弥散方程模拟复垦土壤剖面可溶性钾的长期质量浓度变化情况。模拟时设置初始灌溉量 20 mm,灌溉液中可溶性钾质量浓度为 172.9 mg/L,以近似表达复垦土壤初期植物栽种时的灌溉和施肥实际。含水量的初始值为各自的田间含水量,上覆土壤为 0.432 2 cm³/cm³,粉煤灰层为 0.518 0 cm³/cm³。钾的初始值设为第 1 阶段试验结束后其在复垦土壤剖面溶液中的质量浓度,上覆土壤层为 20 mg/L,粉煤灰层为 30 mg/L。

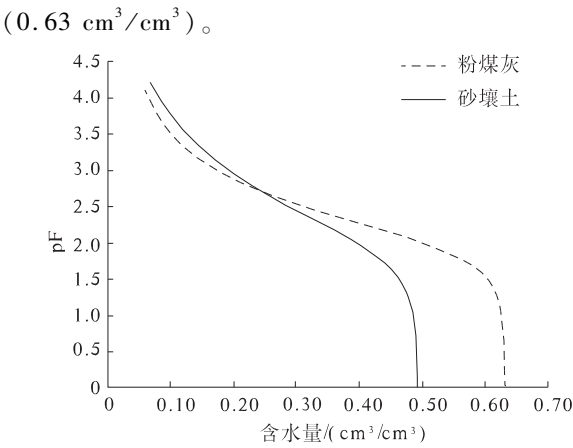


图 2 砂壤土和粉煤灰的持水曲线

2.2 钾的吸附等温线

通过测定溶液中可溶性钾的质量浓度,拟合试验用砂壤土和粉煤灰的线型、Freundlich 型与 Langmuir 型钾吸附等温线(图 3)。从图 3 可以看出,2 种基质的 3 种类型钾吸附等温线的拟合度均较佳。其中,砂壤土中 Langmuir 型钾吸附等温线更加接近于实际($R^2=0.984\ 0$),而粉煤灰中 Freundlich 型钾

吸附等温线的拟合度更佳($R^2=0.991\ 0$)。但 HYDRUS-1D 软件在模拟时默认输入的基质可溶性钾 K_d 值为线型吸附等温线拟合而来的,而本研究可溶性钾在砂壤土和粉煤灰中的线性吸附等温线模型分别为: $y=1.772x$, $y=1.211x$,故 K_d 值分别为 1.772 L/kg 和 1.211 L/kg 。

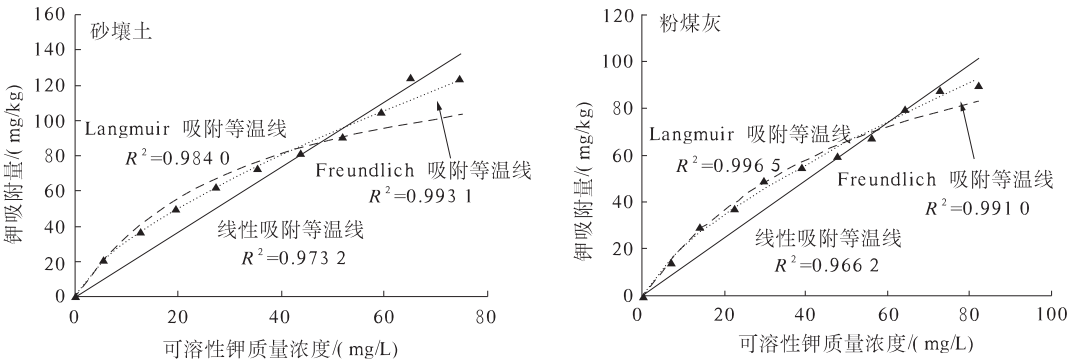


图 3 砂壤土和粉煤灰的钾吸附等温线

2.3 复垦土壤可溶性钾迁移数学模型的验证

用模型计算的可溶性钾质量浓度作为横坐标,土柱试验监测值作为纵坐标,绘制第 2、3 阶段不同地下水位条件下可溶性钾质量浓度监测值与模拟值的散点图(图 4)。其中,钾在液相中的弥散系数取 $1.597\ 5\text{ cm}^2/\text{d}^{[17]}$,在砂壤土、粉煤灰中的交换系数根据 K_d 值分别取 $0.001\ 772$ 、 $0.001\ 211\text{ mL/mg}$ 。

由图 4 可知,在试验的第 2、3 阶段,可溶性钾质量浓度监测值与模型计算值吻合程度较高,均在 1:1

线附近波动。在试验第 2 阶段的低地下水位(−300 cm 以下)条件下,仅监测到 −64 cm 以上复垦土壤剖面的可溶性钾质量浓度;在试验第 3 阶段的高地下水位(−115 cm)条件下,剖面 −94 cm 以上各断面可溶性钾质量浓度监测值与模型计算值极显著相关($P<0.01$)。因此,在有效控制上、下边界条件和初始条件的基础上,对流—弥散方程可以很好地描述粉煤灰充填复垦土壤剖面的可溶性钾迁移特征。

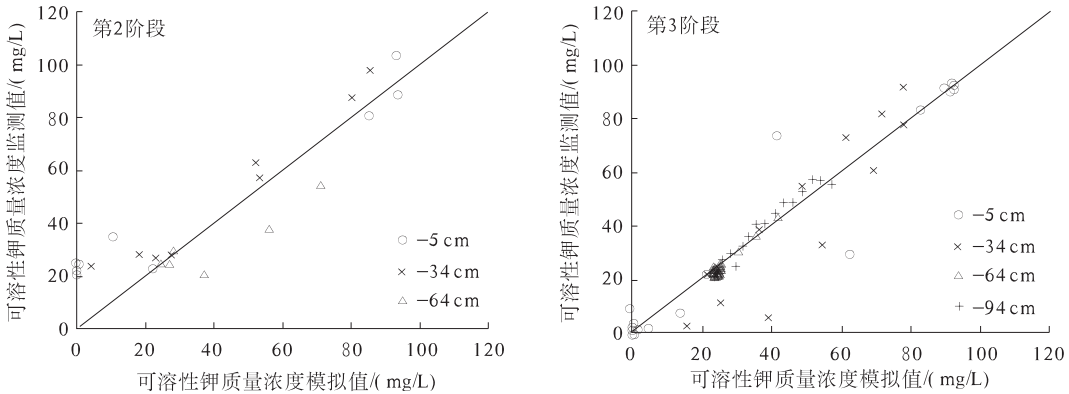


图 4 可溶性钾质量浓度监测值与模型计算值的散点图

2.4 土壤复垦初期可溶钾的迁移特征

由图 5 可以看出,土柱底部滤液中可溶性钾质量浓度在前 4~5 d 内均维持在 $1\ 600\text{ mg/L}$ 左右,之后迅速降低,至 10 d 后约为 8 mg/L 。也就是说,复垦初期若进行田间灌溉或者突降暴雨,上覆土壤和粉煤灰中的绝大部分可溶性钾将会随着水分垂直向下运动迅速迁移至粉煤灰层底部,进入下层土壤或

地下水中。虽然砂壤土和粉煤灰固体骨架对钾具有较强的吸附性,但随着复垦土壤剖面含水量的增加和水分运动,粉煤灰层绝大部分可溶性钾都会析出迁移,复垦土壤底部溶液中可溶性钾质量浓度在最初的 10 d 内即降到绝对低的水平。地下水水位对可溶性钾垂直向下迁移的进程有一定影响,当地下水位较高(−115 cm)时,土柱底部滤液中可溶性钾

质量浓度快速下降所需要的时间比低地下水位(−300 cm以上)时更短。

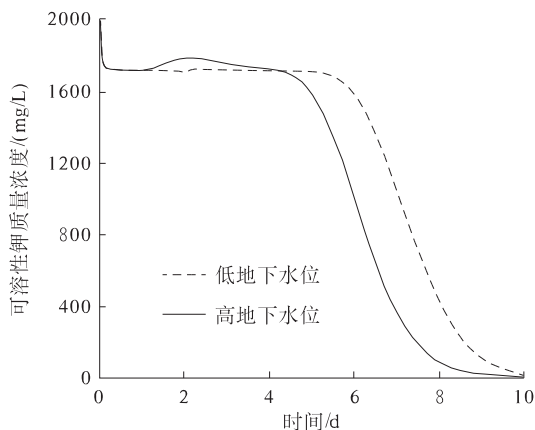


图5 土柱底部滤液中可溶性钾质量浓度变化

2.5 可溶性钾质量浓度的长期变化趋势

从图6可以看出,地下水位对复垦土壤可溶性钾质量浓度变化的影响十分明显。当地下水位较低(−300 cm以下)时,复垦土壤整个剖面可溶性钾质量浓度逐渐降低,上覆土壤可溶性钾质量浓度在200 d和500 d后明显下降,并最终稳定在10 mg/L左右;而粉煤灰可溶性钾质量浓度在第1年的前半年之后即明显下降,逐渐稳定在20 mg/L附近。当地下水位较高(−115 cm)时,上覆土壤和粉煤灰层可溶性钾质量浓度均在第1年的前半年之后下降,第2年又缓慢上升,而且气象因素对可溶性钾质量浓度影响较大,表现出显著相关性,即降雨量少、蒸发量大时,上覆土壤和粉煤灰层中可溶性钾质量浓度升高。

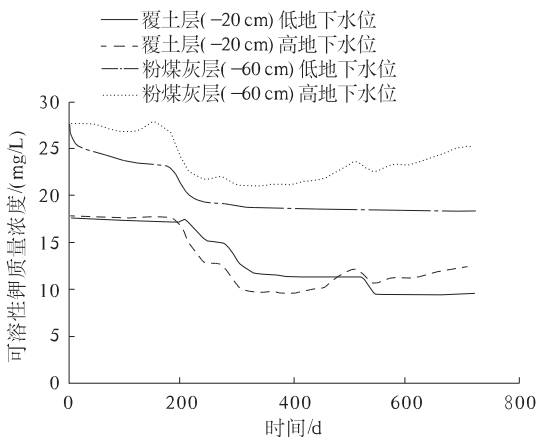


图6 不同地下水位复垦土壤可溶性钾质量浓度变化

3 结论与讨论

土壤可溶性钾对植物钾肥利用具有重要的意义,同时钾的迁移与浓度变化可表征土壤溶液中盐分和其他溶质的运动特征^[18]。本研究在研究复垦

土壤可溶性钾初期迁移和长期浓度变化时发现,如果复垦初期有田间灌溉行为或降雨量较大,绝大部分可溶性钾均会随着土壤水分入渗迅速迁移至下层土壤或地下水,整个过程约需10 d左右。地下水位对复垦土壤可溶性钾质量浓度的长期变化有重要影响。当地下水位较高时,复垦土壤中可溶性钾质量浓度与气象因素保持良好的相关性,即降雨量少、蒸发量大时,上覆土壤中可溶性钾质量浓度升高。此时虽然植物养分利用机会增加,但是上覆土壤盐分和重金属等污染的风险也会增加。当然,试验土柱虽然是在依据复垦地现场技术条件基础上进行的,复垦土壤盐分和重金属污染也是存在的^[8],但可溶性钾在复垦土壤剖面中的初期急剧迁移行为和长期质量浓度变化特征对地下水体的影响程度与趋势需进一步研究证实。

参考文献:

- [1] Asokan P, Saxena M, Asolekar S R. Coal combustion residues—Environmental implications and recycling potentials[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2005, 43(3): 239-262.
- [2] Cao D Z, Selic E, Herbell J D. Utilization of fly ash from coal-fired power plants in China[J]. Journal of Zhejiang University Science A, 2008, 9(5): 681-687.
- [3] Riehl A, Elsass F, Duplay J, et al. Changes in soil properties in a fluvisol (calcaric) amended with coal fly ash utilization of fly ash from coal-fired power plants in China[J]. Geoderma, 2010, 155: 67-74.
- [4] Jayasinha G Y, Tokashiki Y, Kinjo K. Recycling of coal fly ash and paper waste to improve low productive red soil in Okinawa, Japan[J]. Clean, 2009, 37(9): 687-695.
- [5] Gupta D K, Rai U N, Tripathi R D, et al. Impacts of fly-ash on soil and plant responses[J]. Journal of Plant Research, 2002, 115: 401-409.
- [6] Lu S G, Zhu L. Effect of fly ash on physical properties of ultisols from subtropical China[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2004, 35(5/6): 703-717.
- [7] 胡振琪, 戚家忠, 司继涛. 不同复垦时间的粉煤灰充填复垦土壤重金属污染与评价[J]. 农业工程学报, 2003, 19(2): 214-218.
- [8] 胡振琪, 魏忠义, 秦萍. 塌陷地粉煤灰充填复垦土壤的污染性分析[J]. 中国环境科学, 2004, 24(3): 311-315.
- [9] 董霁红, 于敏, 程伟, 等. 矿区复垦土壤种植小麦的重金属安全性[J]. 农业工程学报, 2010, 26(12): 280-286.
- [10] 董霁红, 卞正富, 雷少刚, 等. 徐州矿区充填复垦土壤特性实验研究[J]. 水土保持研究, 2008, 15(1):

234-237.

[11] 胡振琪,戚家忠,司继涛. 粉煤灰充填复垦土壤理化性状研究[J]. 煤炭学报,2002,27(6):639-643.

[12] 牟守国,董霁红,王辉,等. 采煤塌陷地充填复垦土壤呼吸研究[J]. 中国矿业大学学报,2007,36(5):663-668.

[13] 王辉,韩宝平,卞正富. 充填复垦土壤水分竖直运动模拟研究[J]. 中国矿业大学学报,2007,36(5):690-695.

[14] van Genuchten M T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1980, 44: 892-898.

[15] Jacques D, Šimůnek J, Timmerman A, *et al.* Calibration

of Richards' and convection-dispersion equations to field-scale water flow and solute transport under rainfall conditions[J]. Journal of Hydrology,2002,259:15-31.

[16] Freijer J I, Post T M, Ploeger B A, *et al.* Application of the convection-dispersion equation to modelling oral drug absorption[J]. Bulletin of Mathematical Biology,2007, 69(1):181-195.

[17] Victor M M L, Ana C F R, Luis M P V. Diffusion coefficients in aqueous solutions of potassium chloride at high and low concentrations [J]. Journal of Molecular Liquids,1998,78:139-149.

[18] 刘宏鸽,王火焰,周健民,等. 不同有效钾提取方法的原理与效率比较[J]. 土壤,2012,44(2):242-253.

(上接第 51 页)

参考文献:

[1] 李宇峰,尹志刚,周国勤,等. 氮肥用量对不同品质类型小麦群体动态及产量的影响[J]. 河南农业科学, 2013,42(8):12-15.

[2] 杨滨娟,钱海燕,黄国勤,等. 秸秆还田及其研究进展[J]. 农学学报,2012,2(5):1-4.

[3] 赵四申,张西群,贾素梅,等. 玉米秸秆整株还田对小麦生长发育及产量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2003,11(1):145-147.

[4] 闫翠萍,裴雪霞,王姣爱,等. 秸秆还田与施氮对冬小麦生长发育及水肥利用率的影响[J]. 中国生态农业学报,2011,19(2):271-275.

[5] 蒋向,任洪志,贺德先. 玉米秸秆还田对土壤理化性状与小麦生长发育和产量的影响研究进展[J]. 麦类作物学报,2011,31(3):569-574.

[6] 屈会娟,李金才,沈学善,等. 秸秆全量还田对冬小麦不同小穗位和粒位结实粒数和粒重的影响[J]. 中国农业科学,2011,44(10):2176-2183.

[7] 马东辉,王月福,周华,等. 氮肥和花后土壤含水量对小麦干物质积累、运转及产量的影响[J]. 麦类作物学报,2007,27(5):847-851.

[8] 赵俊晔,于振文. 不同土壤肥力条件下施氮量对小麦氮肥利用和土壤硝态氮含量的影响[J]. 生态学报, 2006,26(3):815-822.

[9] 段红光. 增施有机肥对小麦生育特性产量的影响[J]. 安徽农业科学,2013,41(10):4353-4355.

[10] 李春明,熊淑萍,杨颖颖,等. 不同肥料处理对豫麦 49 小麦冠层结构与产量性状的影响[J]. 生态学报, 2009,29(5):2514-2519.

[11] 倪永静,任德超,葛君,等. 秸秆还田与氮肥配施对小麦 22 灌浆速率及产量的影响[J]. 中国农学通报, 2013,29(24):105-108.

[12] 杨宪龙,路永莉,同延安,等. 长期施氮和秸秆还田对小麦-玉米轮作体系土壤氮素平衡的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2013,19(1):65-73.

[13] 张瑞,张贵龙,陈冬青,等. 不同施肥对农田土壤微生物功能多样性的影响[J]. 中国农学通报,2013,29(2):133-139.

[14] 李占,丁娜,郭立月,等. 有机肥和化肥不同比例配施对冬小麦-夏玉米生长、产量和品质的影响[J]. 山东农业科学,2013,45(7):71-77.

[15] 邵云,赵院利,冯荣成,等. 耕层调控和有机物料还田对小麦产量及氮磷钾分配利用的影响[J]. 麦类作物学报,2013,33(1):117-122.

[16] 贾亮,翟丙年,冯梦龙,等. 不同水肥优化模式对冬小麦生长发育及产量的影响[J]. 西北农林科技大学学报,2012,40(10):75-81.

[17] 姚国才,杨勇,马鸿翔,等. 不同氮肥运筹对弱筋小麦产量与品质的影响[J]. 中国农学通报,2009,25(8): 159-163.