

## 融雪期融雪水下渗分析及下渗率模拟研究

张波<sup>1,2</sup>, 刘志辉<sup>1,2,3</sup>, 王慧<sup>1,2</sup>, 房世峰<sup>4\*</sup>

(1. 新疆大学资源与环境科学学院, 新疆乌鲁木齐 830046; 2. 新疆大学教育部绿洲生态重点实验室, 新疆乌鲁木齐 830046; 3. 新疆大学干旱生态环境研究所, 新疆乌鲁木齐 830046; 4. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

**摘要** 融雪期土壤下渗对于融雪产流有重要意义。土壤下渗率的模拟可以为融雪径流模拟提供必要的参数, 能够更精确地对融雪期洪水进行预报。在研究过程中, 通过融雪期对土壤湿度、温度的观测及设置的下渗实验获取的数据, 利用 Excel、SPSS 等统计软件对数据进行综合处理, 并对结果进行制图、制表。结果表明: 土壤湿度和土壤温度对融雪水下渗有显著影响; 冻土中冰的存在对下渗的阻碍作用很强, 冰融化后可以增强融雪水的下渗; 在融雪期, 实验得到的下渗率模型的模拟精度高, 其形式上与 Kostiakov 下渗公式吻合。

**关键词** 融雪期; 下渗率; Kostiakov 下渗公式; 模拟

**中图分类号** S271; P426.63 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2013)24-09975-03

### Analysis of Snowmelt Water Infiltration and Simulation of Infiltration Rate in Snowmelt Period

ZHANG Bo et al (School of Resources and Environment Science, Xinjiang University, Urumqi, Xinjiang 830046)

**Abstract** The soil infiltration plays a significant role in snowmelt runoff in snowmelt period. The simulation of soil infiltration can provide the necessary parameter for the simulation of snowmelt runoff, so the forecast of snowmelt flood can be more accurate. In the research, the data of soil moisture, soil temperature can be collected by some equipments, and the data of water infiltration can be achieved by setting certain experiment. Meanwhile, these data are processed by the software Excel and SPSS, and then figured out the result. The result showed that the soil moisture and soil temperature indicates significant influence on snowmelt infiltration. The ice in frozen soil has strong inhibition effect on infiltration, but after the ice melt, the intensity of infiltration is strengthen. In the snowmelt period, the infiltration model possesses high accuracy, the type of the model and the formula of Kostiakov can be fitted very well.

**Key words** Snowmelt period; Infiltration rate; Kostiakov infiltration formula; Simulation

我国对冻融土壤入渗规律的研究主要集中在融雪水入渗与农业灌溉方面, 为农业灌溉提供了数据支持与理论指导。目前, 对于季节性冻土的入渗有一定的研究<sup>[1-2]</sup>, 同时一些学者对于影响入渗的因素开展了相关的工作<sup>[3-6]</sup>, 而这些研究多数是着眼于农业生产方面的<sup>[7-8]</sup>, 对于融雪径流方面的研究直到 2010 年前后才开始<sup>[9]</sup>。

国外对冻土的研究较早, 在 20 世纪 70 年代前后已有学者开始关注冻土。关于冻融期冻土影响径流的研究, 最早始于 Anderson<sup>[10]</sup>对北美亚极地融雪水型河流的水文情势研究, 融化期径流系数高达 0.7~0.8。Slaughter 等<sup>[11]</sup>阐述其原因是冻土作为不透水层可提高流域融雪与降雨径流的产流量。这与 Cline<sup>[12]</sup>提出的只要有积雪存在, 液态水入渗到冻土中就被阻碍有相似之处。土壤作为介质是产流的关键之一, 而冻融条件下土壤水分运移是冻土水文过程模拟的关键环节<sup>[13-18]</sup>。在融雪期, 利用实验仪器对土壤特性进行观察, 配合室外设定的实验对冻土的下渗情况进行初步的探索, 并且对 Kostiakov 提出的下渗公式进行参数调整工作, 以期得到适用于研究区的下渗公式。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验土壤 研究区土壤以粉壤土为主, 地表初始含水

**基金项目** 国家自然科学基金面上项目“天山北坡典型流域积雪-冻土水热耦合中融水产汇流机制研究”(41171023)和重点项目“干旱区湖泊流域陆面过程及人类活动适应性—以艾比湖流域为例”(41130531); 水利部公益性行业科研专项经费项目(201301103)。

**作者简介** 张波(1987-), 男, 河南信阳人, 硕士研究生, 研究方向: 水文水资源。\* 通讯作者, 助理研究员, 博士, 从事陆面过程模拟、水文水资源以及“3S”技术应用等方面的研究, E-mail: fangsf@igsrr.ac.cn。

**收稿日期** 2013-06-24

率为 0.07%, 观测期间存在冻深 40 cm 的季节性冻土 14 d, 冻深 20 cm 的季节性冻土 2 d。土质随着土层深度的增加而紧密, 垂直方向为非均质。

由表 1 可知, 土壤粒径在 0~20 和 40 cm 土层以 0.050~0.005 cm 为主, 30、50 cm 土层的土壤粒径以大于 0.050 cm 为主, 在 50 cm 深度以上的土壤中粒径小于 0.005 cm 的土壤含量均在 3% 以下。

表 1 不同土壤粒径所占比例

埋深 cm	土壤粒径//cm			%
	>0.050	0.050~0.005	<0.005	
5	48.01	50.47	1.52	
10	39.86	58.03	2.11	
20	39.47	58.24	2.29	
30	58.73	39.85	1.42	
40	46.25	52.31	1.44	
50	56.29	42.60	1.11	

饱和导水率在 5、20、40 cm 土层中分别为 0.63、0.47、0.17 mm/min, 透水性随着土层深度的增加而减小。

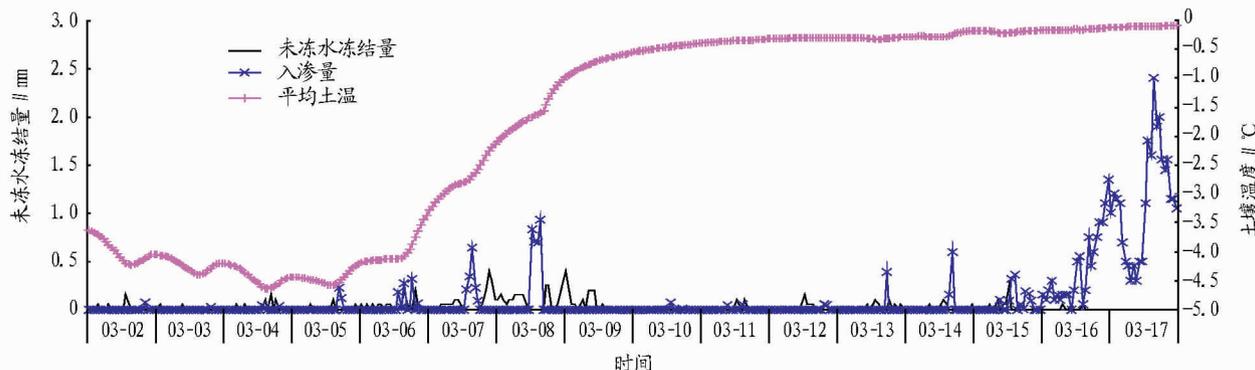
**1.2 试验方法及数据处理** 将采集到的数据进行处理, 并且结合多种影响因素进行综合、分析。分析、处理采集到的土壤下渗、土壤含水率数据, 通过设置下渗试验获取数据, 并且利用 Excel 和 SPSS19.0 等数据处理软件对数据进行进一步的分析。

## 2 结果与分析

**2.1 土壤物理特性分析** 在融雪期, 土壤特性会存在一定的变化。这里所讨论的土壤物理特性主要为土壤粒径、土壤温度、土壤湿度等条件。土壤粒径在整个融雪期中不会发生较大的变化。这与本来的地层是一致的, 只是土壤粒径的存

在会使得浅表土层的内部结构有较大的分异,从而对土层的孔隙度有一定的影响。土壤湿度和土壤温度对土壤下渗的影响较大。经过冻融循环过程后,土壤层的孔隙度会由于不同的土壤含水率和土壤冻结温度而产生较大的差异<sup>[19]</sup>。因

此,在融雪的不同阶段,对于不同的初始土壤湿度来说,遵循的规律也有较大差别。由图 1 可知,在没有冻土融化的条件下,土壤层的湿度变化几乎为 0 或存在较小的波动,但是当土温升高,并且冻土发生融化后,土壤湿度变化明显,且随着



注:测定时间均为 12:00。

图 1 未冻水日冻结量

土壤温度的升高呈现出一定的规律性。

**2.2 融雪期土壤下渗过程分析** 下渗过程的发生是有条件的。在融雪期,冻土的存在极大地干扰了融雪水的下渗过程。这主要是由于冻土中冰的存在使得原本土壤中水分所占的体积增大,也就是由于冻融作用,土壤的剩余孔隙度减小,即融雪水可以通过这些空隙进入土壤层的通道而变小了,而当冻土层融化后,土壤的孔隙度会比原来更大,对融雪

水的下渗会有增强作用。

由图 2 可知,土壤湿度变化在土壤表层的表现尤为明显,而下层土壤湿度几乎没有发生任何改变。这也从一个侧面说明融雪水下渗只是到达土壤的浅层,在土壤浅层由于受到冻土中冰层的影响而使得上层下渗的融雪水无法深入。因此,该段时间内的融雪水在满足上层土壤的下渗后,几乎全部形成地表径流,进入河道汇流。这一时期也是可能产生

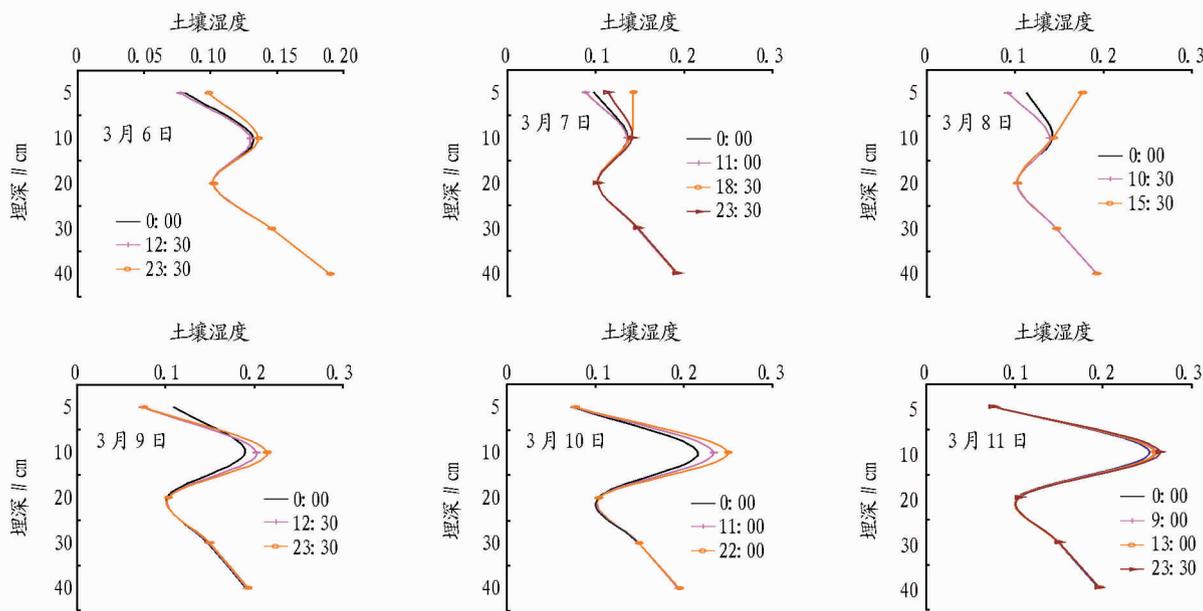


图 2 融雪期中期土壤湿度变化特征

大洪水的时期。

由图 3 可知,随着土壤温度的上升,土壤中的冰融化,土壤下渗能力有所增强。3 月 15 ~ 17 日土壤湿度的增加不仅发生在土壤表层,在下层土壤中也有较明显的土壤湿度增加现象,并且由于冻土的融化,土壤下渗强度增强。由此关系可以分析融雪水下渗的关系。

**2.3 下渗率的模拟及 Kostikov 公式的参数测定** 在融雪

期,利用双环冻土下渗实验的方式进行土壤下渗过程的测定。在水源补给充足的条件下,研究冻土下渗情况。由图 4 可知,随着时间的延长,单位时间内下渗量有逐步减小的趋势,再减小到一定程度后,土壤下渗维持在一定的水平上,并且基本保持不变,此时土壤的下渗已达到稳渗,土壤层基本达到饱和状态。

利用在野外实验条件下所获得的数据进行分析。在时

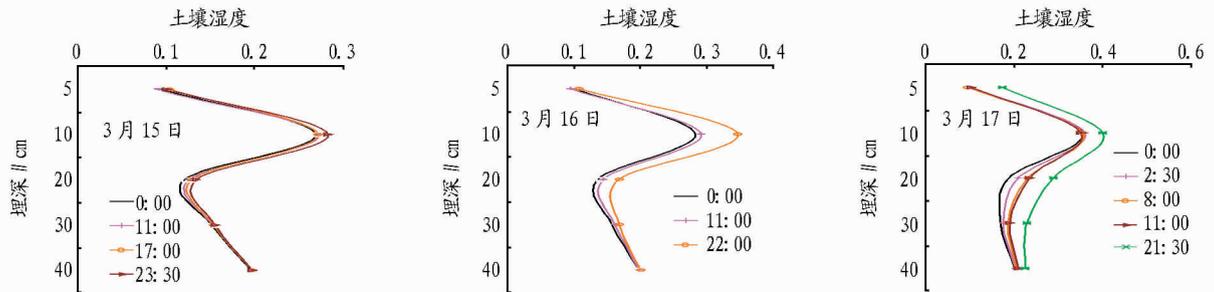


图3 融雪后期土壤湿度变化特征

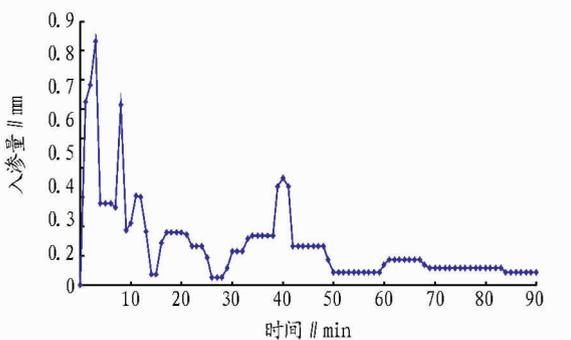


图4 冻土入渗率的变化

间间隔上需要做一定的调整,前5 min以1 min为计数单元,进行下渗量的统计,之后为5 min,至10 min后时间间隔为10 min。利用Excel、SPSS等软件对结果进行回归分析,将下渗量看成是在下渗时间上的函数,采用线性回归、多项式回归、指数回归、对数回归以及乘幂回归的方式进行模拟。从表2可以看出,采用乘幂回归模拟得到的效果最佳,其确定性系数可以高达0.923,通过0.001的极显著检验。因此,对冻土下渗率进行模拟时,采用乘幂回归。

表2 下渗率回归模拟结果

模拟方式	模拟函数	确定性系数	显著水平 (P)
线性回归	$\theta = -0.0061t + 0.4713$	0.5704	<0.01
多项式回归	$\theta = 0.0001t^2 - 0.0169t + 0.5616$	0.7022	<0.01
乘幂回归	$\theta = 0.962t^{-0.6289}$	0.9230	<0.001
对数回归	$\theta = -0.1564\ln(t) + 0.6953$	0.8563	<0.001
指数回归	$\theta = 0.4628e^{-0.0298t}$	0.8937	<0.001

注:  $P < 0.01$  为通过显著性检验;  $P < 0.001$  为通过极显著检验。

Kostiakov 于 1932 年提出 Kostiakov 公式,即

$$k = cx^{-b} \quad (1)$$

式中,  $k$  为下渗率;  $c$  和  $b$  为比例系数;  $x$  为下渗时间。通过对冻土下渗模拟,可以得出  $c = 0.962$ ,  $b = 0.6289$ 。该下渗公式适用于天山北坡军塘湖流域融雪期的冻土下渗。在冻土存在条件下,初始下渗率为  $0.962 \text{ mm/min}$ 。

### 3 结论与讨论

通过对融雪期冻土下渗的观测及对冻土的分析、模拟,发现当土壤湿度在起冻湿度以上时,土壤温度和湿度对土壤下渗有阻碍作用,且随着冻结程度的增强,阻碍作用越强;冻土下渗过程中,受到冻土中冰的阻碍,会对下渗过程有阻滞作用,随着冰的消融,下渗过程比未冻土的下渗强度还要大;

双环试验得到的下渗结果与 Kostiakov 公式所描述的内容吻合,经过参数率定后适用于研究区的下渗率公式为  $\theta = 0.962t^{-0.6289}$ ,模型模拟的确定性系数可以高达 0.923,通过 0.001 极显著水平的检验。

该研究针对融雪期的土壤下渗做了一些尝试。从结果来看,对土壤下渗的模拟较好。Kostiakov 的下渗公式是可以在天山北坡军塘湖流域的融雪期使用的。但是,对于融雪期下渗时刻的确定还存在一定的难度。因此,对于融雪期径流产生量及下渗量的量化测定还有待进一步研究。

### 参考文献

- [1] 延耀兴,郑秀清. 季节性冻融条件下草地入渗特性的试验研究[J]. 水土保持学报,2007,21(5):34-37.
- [2] 樊贵盛,郑秀清. 季节性冻融土壤的冻融特点[J]. 土壤学报,2000,37(1):24-32.
- [3] 薛明霞. 季节性冻融土壤入渗的影响因素分析[J]. 山西水利科技,2007,23(4):57-59.
- [4] 樊贵盛,郑秀清. 地下水埋深对冻融土壤水分入渗特性影响的试验研究[J]. 水利学报,1999,21(3):21-26.
- [5] 郑秀清,樊贵盛. 土壤含水率对季节性冻土入渗特性影响的试验研究[J]. 农业工程学报,2000,28(6):52-55.
- [6] 邢彦彦. 灌溉水温对冻融土入渗规律的影响[J]. 农业工程学报,2002,35(2):41-44.
- [7] 陈军锋,郑秀清. 地表覆膜对季节性冻融土壤入渗规律的影响[J]. 农业工程学报,2006,25(7):18-21.
- [8] 陈军锋,郑秀清. 玉米秸秆覆盖对季节性冻融土壤入渗能力的影响[J]. 太原理工大学学报,2007,23(1):60-62.
- [9] 戴长雷,孙思淼. 高寒区土壤包气带融雪入渗特征及其影响因素分析[J]. 水土保持研究,2010,24(3):33-36.
- [10] ANDERSON E A. A point energy and mass balance model of snow cover [R]. NOAA. Technical Report NWS 19, US Department of Commerce, 1976.
- [11] SLAUGHTER C W, HILGERT J W, CULP E H. Summer stream flow and sediment yield from discontinuous permafrost headwaters catchments [C]//Proceedings, Fourth International Conference on Permafrost. Fairbanks, Alaska, 1983:1172-1177.
- [12] CLINE D W. Snow surface energy exchanges and snowmelt at a continental midlatitude Alpine site[J]. Water Resources Research, 1997,33:689-701.
- [13] NIU G Y, YANG Z L. Effects of frozen soil on snowmelt runoff and soil water storage at a continental scale [J]. Journal of Hydrometeorology, 2006,7(5):937-952.
- [14] YAMAZAKI Y, KUBOTA J, OHATA T, et al. Seasonal changes in runoff characteristics on a permafrost watershed in the southern mountainous region of eastern Siberia[J]. Hydrological Processes, 2006,20(3):453-467.
- [15] STAHLI M, NYBERG L, MELLANDER P E, et al. Soil frost effects on soil water and runoff dynamics along a boreal transect; 2. Simulations [J]. Hydrol Process, 2001,15:927-941.
- [16] ZUZEL J F, PIKUL J L, RASMUSSEN P E. Tillage and fertilizer effects on water infiltration[J]. Soil Science of America Journal, 1990,54(1):205-208.

### 3 今后土壤无机氮残留的研究工作

**3.1 确定最佳经济施肥量** 氮肥是土壤无机氮残留的最重要影响因素。施氮量的增加通常导致土壤无机氮残留的增加。减少氮肥用量是调控土壤无机氮残留的有效措施。目前,我国耕作土壤可减施氮肥 1/3 而仍保持较高产量。确定氮肥减少量,一般考虑农学、环境、经济等意义,采用最佳经济施肥量兼顾考虑农学和环境等意义。由于土壤的多样性,确定最佳经济施肥量时还要考虑气候、地形、作物、季节、环境容量、价格等。最佳经济施肥量的确定还要通过多点调查和田间试验,借助 3S(GIS, GPS, RS) 技术。

**3.2 植物性硝化抑制剂的研制和开发** 脲酶/硝化抑制剂可调控土壤无机氮残留,但化学抑制剂成本高,或多或少会带来环境问题。为此,有些科学家研究自然硝化抑制剂尤其是植物性硝化抑制剂。植物性材料在土壤中空穴供体,分解缓慢,分解产生酸,可提供局部的厌氧条件。这些都为它作为硝化抑制剂提供条件。有研究表明,茶树枯枝落叶、印楝油等硝化抑制效果较好<sup>[35-36]</sup>。从有机物料滥放导致水环境问题、施入土壤可增加碳储存和减少化肥用量等角度考虑,植物性硝化抑制剂研制和开发意义重大。但是,植物性材料施入土壤可增加反硝化潜势,带来负面环境影响。所以,植物性硝化抑制剂值得深入研究。

#### 参考文献

[1] ZHANG W L, TIAN Z X, ZHANG N, et al. Nitrate pollution of groundwater in northern China [J]. *Agriculture, Ecosystem and Environment*, 1996, 59: 223-231.

[2] SHRESTHA R K, LADHA J K. Recycling of residual soil nitrogen in a lowland rice-sweet pepper cropping system [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2000, 64: 1689-1698.

[3] 唐文菊, 赵庆芳. 硝态氮与铵态氮对西伯利亚百合生长的影响[J]. *安徽农业科学*, 2013, 41(14): 6125-6126, 6145.

[4] BERGSTRÖM L F. Leaching of total nitrogen from nitrogen-15-labeled poultry manure and inorganic nitrogen fertilizer [J]. *Journal of Environmental Quality*, 1999, 28(4): 1283-1290.

[5] ZVOMUYA F, ROSEN C J, RUSSELLE M P, et al. Nitrate leaching and nitrogen recovery following application of polyolefin-coated urea to potato [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2003, 32: 480-489.

[6] BÉLANGER G, ZIADI N, WALSH J R. Residual soil nitrate after potato harvest [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2003, 32: 607-612.

[7] 袁新民, 同延安, 杨学云, 等. 有机肥对土壤硝态氮累积的影响[J]. *土壤与环境*, 2000, 9(3): 197-200.

[8] 刘宏斌, 李志宏, 张维理, 等. 露地栽培条件下大白菜氮肥利用率与硝态氮淋溶损失研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2004, 10(3): 286-291.

[9] 王兴仁, 张福锁, ODOWSKI R. 石灰性潮土对氮肥连续施用的环境承受力[J]. *北京农业大学学报*, 1995, 21(S1): 95-98.

[10] 周顺利, 张福锁, 王兴仁. 土壤硝态氮时空变异与土壤氮素表现盈亏 I. 冬小麦[J]. *生态学报*, 2001, 21(11): 1782-1784.

[11] 李建民, 李世娟, 曾长立, 等. 冬小麦限水灌溉条件下土壤硝态氮变化与氮素平衡[J]. *华北农学报*, 2003, 18(2): 51-55.

[12] 张霞, 罗延庆, 张胜全, 等. 限水条件下氮肥用量及施氮时期对冬小麦产量、土壤硝态氮含量的影响[J]. *华北农学报*, 2007, 22(3): 163-167.

[13] 王春阳, 周建斌, 郑险峰, 等. 不同栽培模式对小麦-玉米轮作体系土壤硝态氮残留的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2007, 13(6): 991-997.

[14] 谢云, 王延华, 杨浩. 土壤氮素迁移转化研究进展[J]. *安徽农业科学*, 2013, 41(8): 3442-3444, 3462.

[15] 郑志侠, 宋马林. 柘皋河流域农田土壤磷迁移过程的模拟研究[J]. *安徽农业科学*, 2011, 39(13): 7667-7669, 7909.

[16] 郑圣先, 刘德林, 聂军, 等. 控释氮肥在淹水稻田土壤上的去向及利用率[J]. *植物营养与肥料学报*, 2004, 10(2): 137-142.

[17] INGRID K T, BENT T C. Cropping system and residue management effects on nitrate leaching and crop yields [J]. *Agriculture, Ecosystem and Environment*, 1998, 68: 73-84.

[18] 袁新民, 同延安, 杨学云, 等. 施用磷肥对土壤硝态氮累积的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2000, 6(4): 397-403.

[19] 孙志梅, 薛世川, 彭正萍, 等. 影响土壤硝态氮淋失的因素及预防措施[J]. *河北农业大学学报*, 2001, 24(3): 95-99.

[20] KIRCHMANN H. Balance study with aerobic-anaerobic and flesh <sup>15</sup>N-labelled poultry manure [M]//HANSEN J A, HENRIKSEN K. Nitrogen in organic wastes applied to soils. London: Academic Press, 1989: 113-125.

[21] 熊亚梅, 梁银丽, 周茂娟, 等. 氮肥水平对甘蓝产量和品质及土壤硝态氮含量的影响[J]. *西北植物学报*, 2007, 27(4): 839-843.

[22] 尹飞, 毛任钊, 傅伯杰, 等. 盐渍区农田氮肥施用量对土壤硝态氮动态变化的影响[J]. *生态学报*, 2007, 27(2): 596-602.

[23] FOX T R. Nitrogen mineralization following fertilization of douglas-fir forests with urea in Western Washington [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2004, 68: 1720-1728.

[24] 杨玉惠, 张仁陟. 氮肥施用对黄土高原中部雨养农业区土壤硝态氮分布与累积的影响[J]. *土壤通报*, 2007, 38(4): 672-676.

[25] ZHU Y, FOX R H. Corn-soybean rotation effects on nitrate leaching [J]. *Agronomy Journal*, 2003, 95: 1028-1033.

[26] 董建力, 张学军, 李红霞, 等. 不同水肥处理对春小麦产量、品质和土壤硝态氮含量的影响[J]. *西北农林科技大学学报: 自然科学版*, 2007, 35(1): 77-80.

[27] MAMO M, MALZER G L, MULLA D J. Spatial and temporal variation in economically optimum nitrogen rate for corn [J]. *Agronomy Journal*, 2003, 95: 958-964.

[28] SCHARF P C, KITCHEN N R, SUDDUTH K A. Spatially variable corn yield is a weak predictor of optimal nitrogen rate [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2006, 70: 2154-2160.

[29] STANGER T F, LAUER J G, CHAVAS J. The profitability and risk of long-term cropping systems featuring different rotations and nitrogen rates [J]. *Agronomy Journal*, 2008, 100(1): 105-113.

[30] BHOGAL A, YONG S D, SYLVESTER B R. Straw in incorporation and immobilization of spring applied nitrogen [J]. *Soil Use and Manage*, 1997, 13: 111-116.

[31] 高强, 巨晓棠, 张福锁. 几种新型氮肥对叶菜硝酸盐累积和土壤硝态氮淋失的影响[J]. *水土保持学报*, 2007, 21(1): 9-13.

[32] 郭彦军, 田茂春, 宋代军, 等. 施用羊粪条件下人工草地土壤硝态氮淋失量研究[J]. *水土保持学报*, 2007, 2(2): 53-56.

[33] NYAMANGARA J, BERGSTRÖM L F, PIHA M I, et al. Fertilizer use efficiency and nitrate leaching in a tropical sandy soil [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2003, 32: 599-606.

[34] 隗英华, 陈利军, 武志杰, 等. 脲酶/硝化抑制剂在土壤 N 转化过程中的作用[J]. *土壤通报*, 2007, 38(4): 773-780.

[35] USHA KIRAN, PATRA D D. Influence of natural essential oils and their by-products as nitrification retarders in regulating nitrogen utilization for Japanese mint in sandy loam soils of subtropical central India [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2003, 94: 237-245.

[36] 李宝珍, 王正银, 李会合. 植物性硝化抑制剂对茼蒿 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 和品质的影响[J]. *西南农业大学学报*, 2002, 24(3): 211-213.

(上接第 9977 页)

[17] KANE D L, STEIN J. Water movement in seasonally frozen soils [J]. *Water Resources Research*, 1983, 19: 1547-1557.

[18] BRULAND O, MAREÁCHAL D, SAND K, et al. Killingveit I. Energy and

water balance studies of a snow cover during snowmelt period at a high arctic site [J]. *Theoretical and applied Climatology*, 2001, 70: 53-63.

[19] 刘佳, 范昊明, 周丽丽, 等. 冻融循环对黑土容重和孔隙度影响的试验研究[J]. *水土保持学报*, 2009, 23(6): 186-189.