

霍林河下游洪泛区湿地土壤中铵态氮水平运移模拟研究

白军红¹, 王庆改², 肖 蓉¹, 高海峰¹, 黄来斌¹

(1.北京师范大学环境学院, 水环境模拟国家重点实验室, 北京 100875; 2.环境保护部环境工程评估中心, 北京 100012)

摘 要:选择二百方子洪泛区湿地作为典型研究区,以 NH_4Cl 为示踪剂,模拟研究了铵态氮在洪泛区湿地不同土层中的水平运移过程。结果表明,沼泽湿地土壤中铵态氮的运移通量随运移距离的增加呈一阶衰减指数变化;0~10 cm 土层中铵态氮的运移通量最小,20~60 cm 土层次之,10~20 cm 土层具有最高的铵态氮通量。各层土壤运移通量在 0~6 cm 内最大,而后迅速下降,到 18 cm 时 3 层土壤中铵态氮的运移通量相近并趋近于零。各层土壤中铵态氮的运移通量与土壤水扩散率及土壤含水量都呈一阶指数增长变化;在土壤水扩散率或土壤含水量达到一定数值前,铵态氮运移通量增长缓慢,之后则开始骤然增加。

关键词:洪泛区湿地;水平土柱;铵态氮;水平运移;霍林河下游

中图分类号:X53 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2010)11-2203-05

Horizontal Diffusion of Ammonium Nitrogen in Marsh Soils from a Floodplain Wetland on the Lower Reach of Huolin River, China

BAI Jun-hong¹, WANG Qing-gai², XIAO Rong¹, GAO Hai-feng¹, HUANG Lai-bin¹

(1.State Key Laboratory of Water Environment Simulation, School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

2. Appraisal Center for Environment and Engineering, Ministry of Environmental Protection, Beijing 100012, China)

Abstract: Few studies have been carried out regarding horizontal movements of ammonium nitrogen in marsh soils of the floodplain wetlands, despite they play the very important role in protecting water quality of rivers or lakes. Horizontal movement of ammonium nitrogen was simulated using NH_4Cl tracer in horizontal soil columns from Erbaifangzi floodplain wetland located on the lower reach of Huolin River, in order to study the horizontal diffusion of ammonium nitrogen in wetland soils from the floodplains and to reveal the effects of water diffusion rates and volumetric water contents on ammonium nitrogen movement. Results showed that movement fluxes of ammonium nitrogen decreased exponentially with increasing distances far away from water head. The highest movement fluxes of ammonium nitrogen were observed at 10~20 cm soil horizons, followed by 20~60 cm, and the lowest for 0~10 cm soil horizons. The higher movement fluxes of ammonium nitrogen occurred at the distances from 0 to 6 cm, and then showed a rapid decrease at the distances from 6 to 18 cm. After that they kept constant and nearly approached to zero at the distances exceeding 18 cm. The movement fluxes of ammonium nitrogen at all soil horizons were closely linked to water diffusion rates and volumetric water contents, and they increased exponentially with increasing water diffusion rates and volumetric water contents. The movement fluxes of ammonium nitrogen at each soil horizon showed a slow increase, but increased rapidly after water diffusion rates or volumetric water contents reached a certain level. Therefore, it is very necessary for water quality security of Huolin River to monitor and control ammonium movement in subsurface soils.

Keywords: floodplain wetland; horizontal soil column; ammonium nitrogen; movement fluxes; the lower reach of Huolin River

收稿日期:2010-03-17

基金项目:国家自然科学基金项目(Nos.40701003,50879005);国家重点基础研究计划(973)项目(Nos.2006CB403301,2010CB951102);长江学者和创新团队发展计划(No.IRT0809);北京师范大学自主科研基金(2009SD-24)

作者简介:白军红(1976—),男,河北无极人,博士,副教授,博士生导师,主要研究方向为湿地生物地球化学过程及景观格局变化。

E-mail:junhongbai@163.com。

近 20 多年来,由于氮肥用量剧增,致使许多湖泊、水库等湿地生态系统氮负荷急速上升,富营养化、水质恶化等环境问题日益严重并引起了人们的极大关注。因此,氮在土壤中的运移行为已经成为环境科学和土壤学研究中的热点问题^[1]。氮素在土壤中的运移过程包括水平扩散和垂直淋失两种途径,对地表水和地下水体均具有潜在的污染风险^[2]。土壤氮运移过程实质上是氮以土壤水为载体在土壤中的迁移过程,所以土壤水的运动和变化会直接影响土壤中氮的运动。氮肥的过量使用会导致大量硝态氮迁移,能够对毗邻水体造成严重的面源污染^[3],所以越来越多的研究已集中在土壤中硝态氮的运移规律上^[3-6]。尽管铵态氮易被土壤胶体吸附,但铵态氮在土壤中同样存在迁移过程。朱兆良和文启孝^[7]认为土壤中铵离子迁移的主要机理是扩散过程,但当土壤水分接近饱和时,也可能存在质流或在土壤剖面中随水下渗而迁移至一定深度。许多学者已对湿地还原层和氧化层土壤之间以及湿地不同土层中铵态氮的垂向扩散过程进行了定量研究^[8-11],如近期孙志高等^[12]模拟研究了三江平原湿地小叶章湿地土壤中铵态氮的水平运移规律,但当前对内陆河流洪泛区湿地土壤中铵态氮的水平运移(扩散)研究还不多见。本文研究了霍林河下游洪泛区湿地土壤中铵态氮的水平运移规律,以期为洪泛区湿地的氮过程研究提供基础资料,并为该区湿地土壤质量管理和河流水质保护提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区自然环境特征

向海湿地位于霍林河下游的向海自然保护区内,属于内陆沼泽湿地,为国际重要湿地。该湿地总面积达 36 100 hm²,包括水域面积 12 500 hm² 和芦苇沼泽面积 23 600 hm²^[13]。该区处于北温带大陆性季风气候区半干旱草原地带,年平均气温 5.1 ℃;年平均降水量 408.2 mm,多集中在 7、8 月份;年平均蒸发量 1 945 mm,约为降水量的 5 倍;区内主要有霍林河、额穆泰河等季节性河流、洮儿河引水工程以及向海水库、兴隆水库、尖底泡、付老文泡等蓄水区。研究区土壤类型为沼泽土,植被以芦苇群落为主。

1.2 供试土壤及其基本性质

依据典型性和代表性的原则,选择向海湿地中的二百方子(EBFZ)湿地作为典型研究区;该研究区位于霍林河下游洪泛平原,属于开放性湿地(与季节性河流霍林河存在明显的水力联系,具有明显的干湿季

节变化)。2001 年 8 月在典型区内以多小区、多点混合的方法随机采集土壤样品,按 0~10 cm、10~20 cm 和 20~60 cm 分层采集,并用环刀采集土壤样品测定土壤容重。所有土壤样品装袋带回实验室,自然风干后拣去石块、残根等杂物,各层土壤样品都分为 3 份,其中一份用球磨机磨碎后过 100 目筛,装袋以备测定土壤样品的理化性质,一份磨碎过 20 目筛用于模拟试验,另一份直接装袋用于测定土壤粒度。

土壤基本性质测定方法如下:(1)土壤有机质:重铬酸钾容量法;(2)土壤 pH 值:电位法;(3)土壤粒度分析:比重法,岛津 RS-1000 粒度分布仪。测定结果列于表 1 中。

表 1 供试土壤的基本理化性质

Table 1 Physic-chemical properties of the tested soils in the study area

土层/cm	砂粒/% >0.05 mm	粉砂/% 0.05~0.005	粘土/% <0.005	容重/ g·cm ⁻³	pH	有机质/%
0~10	27.17	45.19	27.64	1.25	8.73	4.09
10~20	79.39	14.76	5.85	1.48	8.78	2.78
20~60	82.87	15.02	2.11	1.45	8.87	0.90

1.3 水平土柱模拟试验设计

1.3.1 试验装置

本试验采用总长度为 100 cm 的圆柱型有机玻璃扩散率仪,圆柱直径为 4.5 cm;通过入渗土体悬殊的厚长比来消除重力势和压力势对水分入渗的影响,使入渗水分在土样基质吸力作用下作水平入渗,以模拟自然条件下的水分水平入渗。试验柱分为 3 段:水室段长 10 cm,连接马氏瓶,以马氏瓶控制恒定水头;滤层段长 10 cm,内装滤网和细石英砂,使水平入渗保持层流状态;试样段长 80 cm,填装供试土样;扩散率仪试样段上侧为取样孔,其间距为 3 cm。试验装置示意图见图 1。

1.3.2 铵态氮的水平运移试验

将各层土样按实测容重称取并分别填入扩散率仪,每层土壤样品都分别做两个示踪试验和 1 个空白对照试验。试验中分别将浓度为 100 mgNH₄⁺·L⁻¹ 的 NH₄Cl 溶液作为示踪剂,用马氏瓶控制水头,来示踪铵态氮在水平土柱中的运移。当湿润峰到达约 40 cm 处时,停止供水或加入示踪剂,立即用取样器自湿润峰端开始,依次从取样孔取样。由于进水端附近土柱的含水率分布会出现跳动和偏高,所以取样至距离滤层 5 cm 处结束。示踪土柱每个取样孔所取土样分为

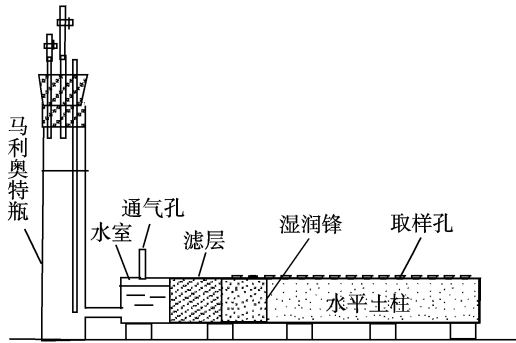


图 1 氮素水平运移模拟试验装置示意图

Figure 1 Sketch map of tester for simulating nitrogen movement with horizontal soil column

2 份,其中一份测定土壤水分含量,另一份测定土壤中硝态氮的浓度。对照土柱每个取样孔所取样品分为 3 份,其中一份测定土壤水分含量,另两份测定土壤中硝态氮含量。在运移试验中,当湿润锋到达 0 cm 和 6 cm 时分别记录时间,然后每增长 3 cm 记录 1 次时间,直至 40 cm 处。

1.4 样品测定方法

土壤含水量采用烘干法测定,在 105 °C 的烘箱内烘 24 h 至恒重;铵态氮的测定采用氯化钾浸提-靛酚蓝比色法^[14]。

2 结果与分析

2.1 洪泛区湿地土壤铵态氮水平运移通量随距离的变化

图 2 表明了二百方子洪泛区湿地土壤铵态氮的运移通量随运移距离的变化。各层湿地土壤中铵态氮运移通量都随运移距离呈指数衰减变化,且模型拟合优度(R^2)都在 0.95 以上。各层土壤运移通量在 0~6 cm 内最大,而后迅速下降,到 18 cm 时 3 层土壤中铵态氮的运移通量基本上汇合成一条直线并趋近于零。0~10 cm 土层铵态氮的运移通量最小且接近于零,明显小于其他两层土壤铵态氮的运移通量(图 2),这与付老文泡湿地土壤铵态氮的运移规律一致^[15]。

2.2 洪泛区湿地铵态氮运移通量与水分扩散率和土壤含水量的关系

图 3 表明了二百方子洪泛区湿地铵态氮运移通量与土壤水分扩散率的关系。各土层铵态氮运移通量与水分扩散率之间存在着指数增长函数关系,除 10~20 cm 土层的拟合优度为 0.79 外,其他两层都达到 0.95 以上(图 3),这表明水分扩散对土壤铵态氮的运移存在显著的制约作用。洪泛区湿地各土层铵态氮的

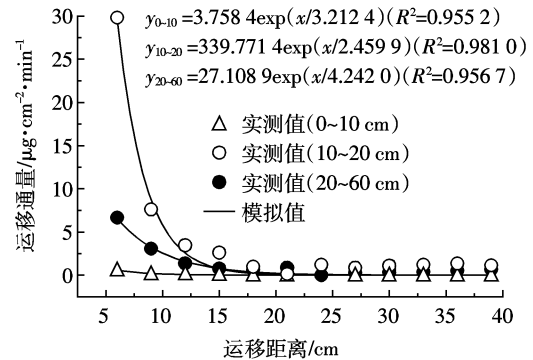


图 2 二百方子洪泛区湿地土壤铵态氮运移通量随运移距离的变化

Figure 2 Changes in transport fluxes of ammonium nitrogen with increasing distances in wetland soils from the EBFZ floodplain

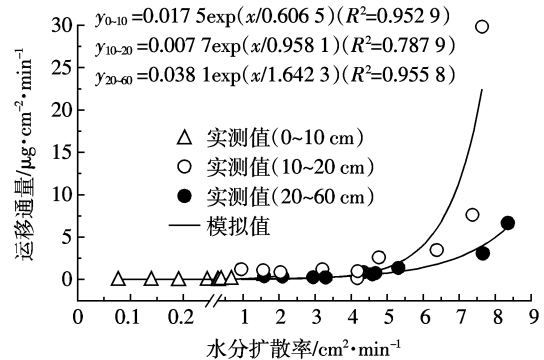


图 3 二百方子洪泛区湿地土壤铵态氮的运移通量与水分扩散率的关系

Figure 3 Relationship between transport influx of ammonium nitrogen and water diffusion rates in wetland soils from the EBFZ floodplain

运移量随水分扩散率的变化规律相近。当土壤水扩散率达到 0.32 $\text{cm}^2 \cdot \text{min}^{-1}$ 之前,0~10 cm 土层中铵态氮运移通量增长缓慢且接近零,之后铵态氮运移通量迅速增加;当土壤水分扩散率接近 5.0 $\text{cm}^2 \cdot \text{min}^{-1}$ 之前,10~20 cm 和 20~60 cm 土层中的铵态氮运移通量增长也较为缓慢,之后骤然增加;其中 10~20 cm 土层增加趋势更为显著。

图 4 表明了二百方子洪泛区湿地土壤铵态氮运移通量与土壤体积含水量之间的关系。从各土层来看,二百方子湿地土壤铵态氮运移通量与土壤含水量之间呈现出明显的指数增长关系,各层土壤的拟合优度均达到 0.7 以上,这表明土壤含水量的高低直接影响着铵态氮运移的速率^[12]。总体来看,在土壤含水量未接近饱和之前(远离水头)土壤铵态氮的运移通量增长十分缓慢;当土壤含水量接近 0.35 $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ 时,

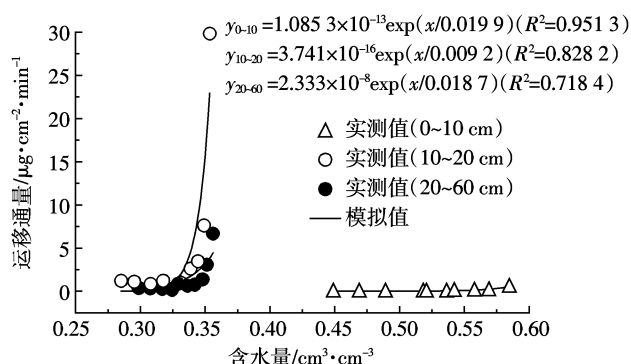


图4 二百方子洪泛区湿地土壤铵态氮的运移通量与土壤含水量的关系

Figure 4 Relationship between movement fluxes of ammonium nitrogen and volumetric water contents in wetland soils from the EBFZ floodplain

10~20 cm 和 20~60 cm 土层中的铵态氮运移通量才迅速增加,且 10~20 cm 土壤增加趋势更为显著。而对于表层土壤,当土壤含水量接近 $0.56 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ 时,铵态氮运移通量才显著增加。

3 讨论

各层土壤铵态氮运移通量随运移距离呈指数下降,这与孙志高等^[12]在研究三江平原小叶章湿地土壤中铵态氮的水平运移速率随运移距离变化时所得规律一致。其原因主要在于铵态氮的水平运移除受浓度梯度、水势梯度和土壤基质势的作用外还受土壤胶体颗粒的吸附作用的制约,当土壤胶体对铵态氮的吸附量达到饱和时,铵离子在水流的作用下迁移^[16]。在湿润峰达到 18 cm 之前,土壤中铵态氮的运移动力主要为浓度梯度和水势梯度,并受到土壤粘粒和胶体的吸附作用;随着运移距离的增加,因土壤粘粒和胶体的大量吸附,铵态氮浓度逐渐下降;同时因土壤水受土粒间的毛管作用,水势梯度也逐渐下降^[16],从而导致运移通量呈指数衰减。当运移距离超过 18 cm 以后,运移动力以土壤基质势为主,但由于绝大部分铵态氮在到达 18 cm 之前已被土壤粘粒和胶体所吸附,所以超过 18 cm 以后,铵态氮的运移通量趋近于零。各层土壤理化性质差异使铵态氮的运移通量曲线存在一定的差异。表层土壤的铵态氮运移通量明显小于其他两层土壤,可能是由于土壤粘粒吸附作用所致^[17]。因为该层土壤的粘粒含量约是下层土壤的 4~13 倍,对铵态氮的吸附量相对较多,且土壤基质势相对较低,不利于铵态氮的运移。此外,该层土壤有机质含量相对较高,也有助于对铵态氮的持留^[11]。10~20 cm 土壤质

地以砂和粉砂为主(表 1),较高的土壤基质势导致该层土壤中铵态氮的运移通量高于 20~60 cm 土层。另外,20~60 cm 土层相对较高的 pH 值和盐基离子也可能在一定程度上抑制了铵态氮的运移^[18]。

洪泛区湿地各土层铵态氮的运移通量随水分扩散率的增长呈指数增长的变化趋势可能与不同土层的理化性质如土壤质地和 pH 值差异密切相关。孙志高等^[12]的模拟试验也得到了相似的研究规律。铵态氮运移通量的大小也表明铵态氮的扩散率要比水的扩散率小几个数量级,其原因是由于铵离子扩散主要受到土壤这一高度分散的带电体系中所具有的物理化学特性与离子的相互作用以及土壤胶体颗粒吸附和解析的影响^[18],只有当吸附的铵离子达到饱和时,才能随水流移动,从而减慢了离子的扩散速度。但值得提出的是在靠近水头的土柱内,0~10 cm 土层的含水量显著高于 10~20 cm 和 20~60 cm 土层($P<0.05$),然而其铵态氮运移通量却明显较低($P<0.05$)。这是由于 0~10 cm 较高的粘粒含量和有机质含量具有高的持水能力,有利于铵的持留。

4 结论

霍林河下游洪泛区湿地各层土壤中铵态氮能够发生水平运移,且运移通量随距离的增加呈一阶指数衰减变化,即距离水头越近运移通量越大。该区土壤中铵态氮的运移通量都与土壤水扩散率和土壤体含水量具有显著的非线性关系,随土壤水扩散率或体含水量的增加呈指数增长变化。总体上,霍林河下游洪泛区湿地各层土壤中铵态氮运移通量大小呈现出 $0 \sim 10 \text{ cm} < 20 \sim 60 \text{ cm} < 10 \sim 20 \text{ cm}$ 的变化,即亚表层(10~20 cm)土壤更有利于铵态氮的水平运移。因此进一步加强该区土壤,尤其是亚表层土壤铵态氮的水平运移研究对保护霍林河水体水质具有重要的现实意义。

参考文献:

- [1] Chang C, Entz T J. Nitrate leaching losses under repeated cattle feedlot manure application in Southern Alberta[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1996, 25(1): 145-153.
- [2] Cavanaugh J C, Richardson W B, Strauss E A, et al. Nitrogen dynamics in sediment during water level manipulation on the upper Mississippi River[J]. *River Research and Applications*, 2006, 22: 651-666.
- [3] Yang C C, Prasher S O, Wang S L, et al. Simulation of nitrate-N movement in southern Ontario, Canada with DRAINMOD-N[J]. *Agricultural Water Management*, 2007, 87: 299-306.
- [4] Baran N, Richert J, Mouvet C. Field data and modeling of water and ni-

- trate movement through deep unsaturated loess[J]. *Journal of Hydrology*, 2007, 345:27-37.
- [5] 白军红, 欧阳华, 邓伟, 等. 向海沼泽湿地土壤中硝态氮水平运移规律[J]. 中国环境科学, 2004, 24(4):414-418.
- BAI Jun-hong, OUYANG Hua, DENG Wei, et al. Horizontal movement rule of nitrate nitrogen in Xianghai marsh wetland soil[J]. *China Environmental Science*, 2004, 24(4):414-418.
- [6] 孙志高, 刘景双, 王金达, 等. 三江平原典型小叶章湿地土壤中硝态氮水平运移的模拟研究[J]. 生态与农村环境学报, 2006, 22(3):51-56, 64.
- SUN Zhi-gao, LIU Jing-shuang, WANG Jin-da, et al. Simulation of horizontal movement of nitrate nitrogen in Typical Calamagrostis angustifolia wetland soils of Sanjiang Plain[J]. *Rural Eco-Environment*, 2006, 22(3):51-56, 64.
- [7] 朱兆良, 文启孝. 中国土壤氮素[M]. 南京:江苏科学技术出版社, 1990.
- ZHU Zhao-liang, WEN Qi-xiao. Chinese soil nitrogen [M]. Nanjing: Jiangsu Science and Technology Press, 1990.
- [8] Reddy K R, Patrick W H Jr, Phillips R E. Evaluation of selected processes controlling nitrogen loss in a flooded soil[J]. *Soil Science Society of American Journal*, 1980, 44:1241-1246.
- [9] Williams, Thomas M. Nitrate leaching from intensive fiber production on abandoned agricultural land[J]. *Forest Ecology and Management*, 1999, 122(1):41-49.
- [10] Reilly J F, Horne A J, Miller C D. Nitrate removal from a drinking water supply with a large-scale free-surface constructed wetlands prior to groundwater recharge[J]. *Ecological Engineering*, 2000, 14:33-47.
- [11] 白军红, 欧阳华, 邓伟, 等. 二百方子沼泽湿地无机氮的垂直运移规律[J]. 干旱地区农业研究, 2005, 23(2):68-70.
- BAI Jun-hong, OUYANG Hua, DENG Wei, et al. Vertical movement patterns of inorganic nitrogen in the Erbaifangzi Wetland[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2005, 23(2):68-70.
- [12] 孙志高, 刘景双, 张党玉, 等. 三江平原典型小叶章湿地土壤中铵态氮水平运移规律研究[J]. 水土保持学报, 2006, 20(5):87-91, 125.
- SUN Zhi-gao, LIU Jing-shuang, ZHANG Dang-yu, et al. Study on horizontal movement of ammonium nitrogen in Typical Calamagrostis angustifolia wetland soils of Sanjiang Plain[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2006, 20(5):87-91, 125.
- [13] 赵魁义. 中国沼泽志[M]. 北京:科学出版社, 1999:255-260.
- ZHAO Kui-yi. Chinese marsh records [M]. Beijing: Science Press, 1999:255-260.
- [14] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京:中国农业科技出版社, 1999:107-147.
- LU Ru-kun. Chemical analysis methods of soil and agriculture [M]. Beijing: China Agricultural Technology Press, 1999:107-147.
- [15] 白军红. 向海湿地土壤氮素生物地球化学过程研究[D]. 长春:中国科学院东北地理与农业生态研究所博士研究生学位论文, 2003.
- BAI Jun-hong. Study on biogeochemical processes of nitrogen in marsh soils of Xianghai Wetland. PhD thesis[D]. Changchun: Northeast Institute of Geography and Agricultural Ecology, Chinese Academy of Sciences, 2003.
- [16] 白冰, 陈效民, 王恒祥. 莱州湾滨海盐渍土中铵态氮水平运移室内模拟试验[J]. 农村生态环境, 2004, 20(4):41-43.
- BAI Bing, CHEN Xiao-min, WANG Heng-xiang. Horizontal migration of ammonium nitrogen in seashore saline soil on the coast of Laizhou Bay[J]. *Rural Eco-Environment*, 2004, 20(4):41-43.
- [17] Bowden W B. Nitrification nitrate reduction, and nitrogen immobilization in a tidal freshwater marsh sediment[J]. *Ecology*, 1986, 67(1):88-99.
- [18] 石元春, 李韵珠, 陆锦文, 等. 盐渍土的水盐运动[M]. 北京:北京农业大学出版社, 1986.
- SHI Yuan-chun, LI Yun-zhu, LU Jin-wen, et al. Water and salt movement in saline soils[M]. Beijing: Beijing Agriculture University Press, 1986.