

松嫩平原土壤孔隙指标与其他土壤指标的相关关系

裴忠雪¹, 武燕^{1,2}, 王琼¹, 仲召亮¹, 任蔓莉¹, 魏晨辉¹, 路嘉丽¹, 王文杰¹

(1. 东北林业大学 森林植物生态学教育部重点实验室, 哈尔滨 150040;

2. 大庆师范学院 生命科学学院, 黑龙江 大庆 163712)

摘要:为了研究东北地区黑土区土壤物理性质变化对土壤功能维持的影响,选取松嫩平原的土壤样品作为试验材料,测定了土壤物理指标中 3 个孔隙相关指标包括土壤比表面积、容重和孔隙度,10 个土壤理化及肥力相关指标包括土壤 pH 值、电导率(EC)、土壤含水量、土壤有机碳(SOC)、全氮(TN)、碱解氮(AN)、全钾(TK)、速效钾(AK)、全磷(TP)、速效磷(AP)。结果显示:3 个指标与其他指标显著相关个数及相关系数 R^2 显示,土壤容重与土壤肥力及理化性质变化相关性最高。不同物理指标对于表征土壤肥力的功能存在差异性,简单线性回归与逐步回归均发现类似的规律:土壤的比表面积与土壤含水量的相关性最强($R^2=0.24$, slope=0.085),表明土壤比表面积越大,土壤持水能力越强;土壤容重与土壤 SOC 含量相关程度最强($R^2=0.21$, slope=-24.92),而土壤的孔隙度与 TN 含量的相关程度最高($R^2=0.08$, slope=0.02)。3 个指标与养分的不同形式的相关性分析结果显示:它们多与全量养分(TN、TK、TP)相关性较高($R^2=0.058$),而与养分速效量(AN、AK 和 AP)相关性较弱($R^2=0.026$)。

关键词:土壤物理性质; 相关性; 回归分析

中图分类号:Q948.113

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2016)02-0134-05

Correlations Between Soil Porosity-Related Parameters and Other Soil Parameters in Songnen Plain, Northeastern China

PEI Zhongxue¹, WU Yan^{1,2}, WANG Qiong¹, ZHONG Zhaoliang¹,
REN Manli¹, WEI Chenhui¹, LU Jiali¹, WANG Wenjie¹

(1. Key Laboratory of Forest Plant Ecology Ministry of Education, Northeast Forestry University,

Harbin 150040, China; 2. College of Life Science, Daqing Normal University, Daqing, Heilongjiang 163712, China)

Abstract: In order to study the influence of soil physical property change on the soil function of the black soil in northeast of China, soil samples from different regions of Songnen Plain were selected as the research materials, and 3 soil porosity-related parameters such as soil specific surface area, soil bulk density and soil porosity were measured, and 10 parameters such as soil fertility and soil physico-chemical properties including soil pH, soil electrical conductivity (EC), soil water content, soil organic carbon (SOC), total nitrogen (TN), alkali-hydrolyzed nitrogen (AN), total potassium (TK), available potassium (AK), total phosphorus (TP), available phosphorus (AP). The results showed that number of significant correlation and R^2 of various correlations between 3 physical properties and other soil parameters indicated that soil bulk density had the most significant correlation with variable soil fertility, soil physico-chemical parameters. Different physical parameters differed in their predicating abilities of variable aspect of soil fertility, both simple linear regression and stepwise regression have found the similar rule: soil specific surface area is capable of predicting soil water due to the fact of strongest positive correlation between these parameters and soil water content($R^2=0.24$, slope=0.085); soil bulk density was significantly correlated with SOC ($R^2=0.21$, slope=-24.92), while soil porosity was significantly correlated with TN ($R^2=0.08$, slope=0.02). The correlation analysis between 3 soil physical parameters and different forms of nutrients showed that soil physical parameters were generally highly correlated with total nutrients (TN, TK, TP) ($R^2=0.058$), but had relatively weak relations with their available forms (AN, AK, AP) ($R^2=0.026$).

收稿日期:2015-03-19

修回日期:2015-04-10

资助项目:国家自然科学基金(31170575,41373075)

第一作者:裴忠雪(1990—),女(满),黑龙江省克山县人,硕士研究生,研究方向:植物生态学。E-mail:1009764815@qq.com

通信作者:王文杰(1974—),男,河北省易县人,教授,研究方向:植物生态学。E-mail:wjwang225@hotmail.com

Keywords: soil physical properties; correlation; regression analysis

东北松嫩平原是我国重要的粮食基地^[1-3],但是土壤退化趋势严重,已经进行了大量土壤肥力^[1,4-5]、土壤碳库^[6-8]、土壤盐碱化^[9-11]等方面的研究,但对于土壤物理性质的研究则相对较少。对物理性质与其他土壤性质的关系及相关性研究,有助于解释土壤退化的物理性质基础,在以往多集中研究土壤理化性质和肥力相关指标退化的基础上,急需从物理性质角度阐述退化机制、提出生态恢复治理的可能建议与措施^[12]。

土壤的物理性质是指土本身由于三相组成成分的相对比例关系不同所表现的物理状态以及固、液两态相互作用时所表现出来的性质,其重要性最近越来越获得重视。与土壤肥力维持相关的物理指标包括土壤比表面积、土壤容重和土壤孔隙度等^[12-13],而本文我们介绍的土壤物理指标主要包括土壤孔隙相关的土壤比表面积、容重和孔隙度三个指标。其中土壤比表面积指的是单位质量或者单位体积的土壤总表面积,是研究土水系统中能量和物质交换极为重要的参数,其大小取决于土壤颗粒大小、形状以及矿物组成,在一定意义上反映了土壤的颗粒组成^[12]。土壤容重多反映土壤的质地和有机质含量、结构和松密度等,而土壤孔隙度是土壤内部空隙多少的体现,其大小决定了土壤的通气性^[12]。土壤物理性质的变化直接影响土壤肥力供应与维持^[14],针对我国重要粮食基地——松嫩平原黑土区土壤物理性质指标与其他土壤性质的相关关系研究,是揭示目前严重退化土壤物理性质如何影响土壤功能的关键。

土壤肥力既包括各种全量养分(TN, TP, TK)的供应能力,也包括其有效性成分(如 AN, AP, AK)供应量,二者对于作物生长具有不同的作用。作为土壤结构基础的有机碳(SOC)量在土壤结构与功能维持中起到重要作用。一些土壤理化指标包括 pH 值、EC 和含水量等直接影响土壤微生物代谢及养分的有效性。不同土壤性质指标所代表的土壤功能存在差异性,这种差异性是否也表现在其与土壤物理性质的相关关系上,需要大量土壤样品测定分析才能够获得可靠结论。

本文在对松嫩平原土壤各指标测定的基础上,对数据进行统计分析,通过研究 3 种土壤物理指标与其他土壤各指标间的相关关系,旨在解决如下问题:(1)土壤比表面积、容重和孔隙度与哪些土壤指标显著相关?(2)哪种孔隙指标能对其他指标有更好的指示作用?(3)养分的不同形式与这 3 种土壤物理指标显著相关的结果怎样?

1 材料与方法

1.1 研究地概况及采样方法

松嫩平原在黑龙江省西南部和吉林省西北部。西起大兴安岭东麓,东北至小兴安岭,东以松花江谷地与三江平原相连,南以松辽分水岭与辽河平原相隔,由松花江和嫩江冲积而成,整个平原略呈菱形。松嫩平原由于受地质历史时期地壳抬升的影响,地势较高,除哈尔滨—齐齐哈尔—白城的三角形地区外,海拔多在 200~250 m。松嫩平原的表面具有波状起伏,因而也被称为波状平原。松嫩平原面积广大,几乎占东北平原的 2/3,年降水量 580 mm,年均气温 2~6℃。土壤肥沃,黑土、黑钙土占 60%以上,是黑龙江省和全国重要的商品粮生产基地。

本文中土样主要来源于在松嫩平原中的杜蒙(46°53'30.59"N, 124°27'6.54"E)、兰陵(45°12'42.43"N, 126°11'17.28"E)、明水(47°11'15.62"N, 125°53'28.77"E)、肇东(46°02'20.18"N, 125°58'6.11"E)、肇州(45°41'40.22"N, 125°16'3.57"E)、富裕(47°45'52.68"N, 124°27'5.96"E)这 6 个地点,共选取 144 块样地,其中明水属黑土、兰陵和富裕属黑钙土、肇东肇州属碱土,杜蒙属砂土。每个样地做 0—100 cm 的土壤剖面,其中地表起 20 cm 作为一层,每层用 100 cm³ 环刀取土样,四次重复,土样用土壤袋带回实验室自然风干,去除杂物,过 0.25 mm 和 2 mm 筛待用。

1.2 土壤各指标的测定

1.2.1 土壤 3 种物理指标的测定 土壤 3 种物理指标的测定包括土壤比表面积、容重和孔隙度的测定。土壤比表面积采用 CH₃COOK 吸附法进行测定^[12];土壤容重采用容重=风干土样重/400 cm³ 的计算方法得到^[15],而土壤孔隙度则采用孔隙度=(1-容重/比重)×100%的计算方法得到,其中土壤比重采用比重瓶法进行测定^[12]。

1.2.2 其他土壤相关指标的测定 其他土壤相关指标的测定包括土壤有机碳(SOC)含量、TN 含量、AN 含量、TK 含量、AK 含量、TP 含量、AP 含量、土壤 pH 值、EC 和土壤含水量含量的测定。土壤 SOC 含量采用重铬酸钾容量法—外加热法进行测定,土壤 TN 含量采用半微量凯氏定氮法进行测定,土壤 AN 含量采用碱解扩散法进行测定,土壤 TK 含量采用 NaOH 熔融—火焰光度法进行测定,土壤 AK 含量采用 NH₄OAc 浸提—火焰光度法进行测定,土壤 TP 含量采用 NaOH 熔融—钼锑抗比色法,土壤 AP 的测定采用 NaHCO₃ 法进行测定^[15];土壤 pH 值的测定采用 Sartorius PB-10 型精密酸度计进行测定,土壤

EC 采用 DDS-307 电导率测定仪进行测定,土壤含水量采用土壤含水量=(鲜重-干重)/干重 $\times 100\%$ 的计算方法得到^[15]。

1.3 数据处理

土壤各指标数据通过 JMP 10.0.0 统计软件进行相关性分析,通过 SPSS 17.0 统计软件进行逐步回归分析,旨在对简单线性分析进行补充,并通过 Excel 2007 进行图表的绘制。

2 结果与分析

2.1 土壤比表面积与土壤各指标相关性分析

土壤的比表面积与其他土壤指标的相关性比较(表 1)可以看出,土壤的比表面积与土壤含水量、AK 含量、TP、SOC 含量、TN 含量、AP 含量、AN 含量呈现出显著的正相关关系,其中与土壤含水量的相关性最强($R^2=0.24$,slope=0.085),与土壤的 pH 值、EC 呈现出显著的负相关关系,其中与 pH 值的相关关系最强($R^2=0.12$,slope=-0.008),但与土壤 TK 不相关。土壤比表面积与土壤速效养分具有更高的相关性,AN、AP 和 AK 都达到了显著正相关水平。

表 1 土壤各指标(Y)与土壤比表面积(X)回归方程

土壤各指标	斜率	截距	R^2	F 值	显著性
土壤含水量/%	0.085	6.504	0.237	209.886	<0.0001
pH 值	-0.008	8.688	0.122	93.858	<0.0001
AK/(mg·kg ⁻¹)	0.405	41.174	0.042	29.674	<0.0001
TP/(g·kg ⁻¹)	0.001	0.222	0.039	27.762	<0.0001
SOC/(g·kg ⁻¹)	0.035	8.120	0.025	17.500	<0.0001
EC/(μS·cm ⁻¹)	-0.377	134.533	0.024	16.769	<0.0001
TN/(g·kg ⁻¹)	0.003	0.799	0.018	12.723	0.0004
AP/(mg·kg ⁻¹)	0.025	4.265	0.014	9.800	0.0018
AN/(mg·kg ⁻¹)	0.252	48.393	0.012	8.245	0.0042
TK/(g·kg ⁻¹)	-0.034	53.892	0.004	2.629	0.1054

2.2 土壤容重与土壤各指标相关性分析

土壤的容重与其他土壤指标的相关性比较(表 2)可以看出,土壤的容重与土壤的 TK 含量、pH 值呈现出显著正相关关系,其中与 TK 含量更相关($R^2=0.04$,slope=25.91),与土壤 SOC 含量、TN 含量、土壤含水量、AN 含量、AK 含量、TP 含量、EC 表现出显著的负相关关系,其中与 SOC 含量相关性最强($R^2=0.21$,slope=-24.92),与土壤的 AP 含量不相关。

2.3 土壤孔隙度与土壤各指标相关性分析

土壤的孔隙度与其他土壤指标的相关性比较(表 3)可以看出,土壤的孔隙度与土壤 TN 含量、SOC 含量、TP 含量、AN 含量、土壤含水量、EC 呈现出显著正相关关系,其中与 TN 含量的相关性最强($R^2=0.08$,slope=0.02),与土壤 TK 含量呈现显著负相

关关系($R^2=0.03$,slope=-0.30),与土壤中的 AK 含量、pH 值、AP 含量不相关。

表 2 土壤各指标(Y)与土壤容重(X)回归方程

土壤各指标	斜率	截距	R^2	F 值	显著性
SOC/(g·kg ⁻¹)	-24.919	46.085	0.212	193.245	<0.0001
TN/(g·kg ⁻¹)	-2.143	4.038	0.207	187.789	<0.0001
土壤含水量/(%)	-14.46	32.675	0.104	83.379	<0.0001
AN/(mg·kg ⁻¹)	-167.375	304.77	0.087	68.245	<0.0001
TP/(g·kg ⁻¹)	-0.440	0.934	0.079	61.722	<0.0001
AK/(mg·kg ⁻¹)	-95.237	203.702	0.039	28.772	<0.0001
TK/(g·kg ⁻¹)	25.909	14.447	0.036	26.55	<0.0001
pH 值	0.655	7.206	0.012	9.038	0.0027
EC/(μS·cm ⁻¹)	-62.532	199.465	0.011	7.769	0.0055
AP/(mg·kg ⁻¹)	-1.639	8.266	0.001	0.746	0.388

表 3 土壤各指标(Y)与土壤孔隙度(X)回归方程

土壤各指标	斜率	截距	R^2	F 值	显著性
TN/(g·kg ⁻¹)	0.018	0.253	0.081	63.131	<0.0001
SOC/(g·kg ⁻¹)	0.192	2.613	0.072	55.974	<0.0001
TP/(g·kg ⁻¹)	0.004	0.161	0.030	21.972	<0.0001
AN/(mg·kg ⁻¹)	1.308	12.047	0.030	22.553	<0.0001
TK/(g·kg ⁻¹)	-0.296	63.494	0.027	19.764	<0.0001
土壤含水量/(%)	0.069	9.138	0.014	9.905	0.0017
EC/(μS·cm ⁻¹)	0.737	80.223	0.009	6.183	0.0131
AK(mg·kg ⁻¹)	0.446	49.035	0.005	3.495	0.062
pH 值	-0.005	8.341	0.004	2.817	0.0937
AP(mg·kg ⁻¹)	0.02	5.123	0.001	0.623	0.4301

2.4 土壤比表面积、容重、孔隙度与其他土壤指标逐步回归分析

土壤比表面积、容重、孔隙度与土壤各指标逐步回归分析(表 4)显示:土壤比表面积主要与土壤含水量、pH 值、EC、TN 含量紧密相关,多项式相关关系为:土壤比表面积=127.58+2.713 \times 土壤含水量-10.382pH-0.049EC-4.061TN($R^2=0.324$),其中与土壤含水量相关性更高,标准化系数为 0.472。

土壤容重与土壤 SOC 含量、土壤含水量、TN 含量、TK 含量、AN 含量具有紧密的相关性,多项式相关关系为:土壤容重=1.532-0.004SOC-0.003 \times 土壤含水量-0.037TN+0.001TK($R^2=0.259$),逐步回归进入顺序以及标准化回归系数均说明,土壤 SOC 含量对容重的影响最大,标准化系数为-0.204,即其为土壤容重的主要影响因子,而其他几个因子的标准化系数在-0.176 到 0.075 之间。

土壤孔隙度与土壤 TN 含量、TK 含量具有紧密的相关性,多项式相关关系为:土壤孔隙度=38.891+4.209TN-0.060TK($R^2=0.092$)。逐步回归进入顺序以及标准化回归系数均说明,土壤 TN 含量对孔隙度的影响最大,标准化系数为 0.261,即土壤孔隙度与养分 TN 含量关系最紧密。

表 4 土壤比表面积、容重、孔隙度与土壤各指标逐步回归分析

土壤孔隙指标	模型	非标准化系数		标准系数	t	Sig.
		B	标准误差			
土壤比 表面积	常量	127.580	12.378		10.307	0.000
	土壤含水量/%	2.713	0.197	0.472	13.775	0.000
	pH 值	-10.382	1.441	-0.247	-7.203	0.000
	EC/($\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$)	-0.049	0.014	-0.118	-3.533	0.000
	TN/($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	-4.061	1.882	-0.077	-2.158	0.031
土壤 容重	常量	1.532	0.018		86.020	0.000
	SOC/($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	-0.004	0.001	-0.204	-3.404	0.001
	土壤含水量/%	-0.003	0.001	-0.150	-4.249	0.000
	TN/($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	-0.037	0.012	-0.176	-2.996	0.003
	TK/($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	0.001	0.000	0.075	2.243	0.025
土壤 孔隙度	AN/($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	0.000	0.000	-0.077	-2.035	0.042
	常量	38.891	1.319		29.485	0.000
	TN/($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	4.209	0.586	0.261	7.182	0.000
	TK/($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	-0.060	0.020	-0.109	-2.985	0.003

简单线性回归分析的结果不能去除变量之间的相互作用,得到的结果说服力往往不够,我们的分析加入了逐步回归的分析方法,通过对简单线性回归与逐步回归分析的结果比较,使得分析结果更具科学性与严谨性。总体来看,两种分析方法对于最大相关因子等的评价结果基本一致,而且,逐步回归结果所找到的显著相关因子个数往往比简单线性回归的要少。总体来讲:

简单线性回归分析得到土壤比表面积与土壤 9 个指标(土壤含水量、pH 值、AK 含量、SOC 含量、EC、TN 含量、TP 含量、AP 含量、AN 含量)显著相关,而逐步回归分析得到土壤比表面积只与土壤含水量、pH 值、EC、TN 含量等四个指标显著相关,逐步回归分析得出土壤含水量和 pH 值分别为第一和第二进入的指标,即其为主要和次要影响因子,这与简单线性分析的结果是一致的(表 1 和表 4)。简单线性回归分析得到土壤容重与 9 个指标(SOC 含量、TN 含量、土壤含水量、AN 含量、AK 含量、TK 含量、TP 含量、pH 值、EC)显著相关,而逐步回归分析得到土壤容重与 5 个指标(SOC 含量、土壤含水量、TN 含量、TK 含量、AN 含量)显著相关。逐步回归分析得出 SOC 含量为第一次进入的指标,即其为主要影响因子,这与简单线性分析的结果是一致的(表 2 和表 4)。

简单线性回归分析得到的土壤孔隙度与 7 个指标(TN 含量、SOC 含量、TP 含量、AN 含量、TK 含量、土壤含水量、EC)显著相关,而逐步回归分析得到土壤孔隙度与 2 个指标(TN 含量、TK 含量)显著相关。逐步回归分析得出 TN 含量为第一次进入的指标,即其为主要影响因子,这与简单线性分析的结果是一致的(表 3 和表 4)。

3 讨论

3 种土壤物理性质指标所能表征的土壤特征方面存在明显的差异,这可以从其相关程度的高低及逐步回归结果看出。首先,简单线性相关和逐步回归结果均说明,土壤比表面积与土壤含水量具有最紧密相关关系($R^2=0.237$)(表 1 和表 4)。作为一个非常重要的物理性质,土壤比表面的大小在很大程度上取决于黏粒的含量及其矿物组成,土壤中发生的物理—化学现象和过程与土壤比表面积密切相关^[12],土壤比表面积为评价和预测土壤行为,尤其是研究土水系统中能量及物质的交换提供极为重要参数,我们的发现同样确认在东北松嫩平原其大小变化最能够表征土壤持水能力的差异。

此外,简单线性相关和逐步回归结果均可看出,土壤容重和孔隙度分别与 SOC 和 TN 含量相关性最显著(表 2,3,4)。土壤容重和孔隙度是比较常用的土壤物理指标,前者与土壤的质地、松密度及有机质含量密切相关,后者的大小决定了土壤的通气性^[16]。采用微区池栽模拟试验,结果表明玉米根际微生物(细菌、放线菌、真菌)数量、微生物量碳和微生物量氮随下层土壤容重增加而降低^[17]。针对落叶松林土壤管理来看,林床清理使得表层土壤容重要比对照未清理样地高 53%,土壤非毛管孔隙度比未处理样地低 49.5%^[18]。对旱地果园土壤采用垄膜覆盖(T_1)、覆草(T_2)和免耕无覆盖(T_3)处理不仅影响了土壤水热、萌芽开花,而且对其土壤物理性质影响可能是一个基础:不同土层 T_1 土壤容重最小,孔隙度最大, T_3 土壤容重最大,孔隙度最小^[19]。我们的研究确认土壤容重与 SOC 相关性最强($R^2=0.21$),孔隙度与 TN 相关性最强($R^2=0.08$),说明与 TP 和 TK 等相比,松嫩平原土壤容重和孔隙度的改变与土壤 SOC

和 TN 具有更加紧密的关系,即两个指标的高低变化在一定意义上表明了土壤中 SOC 和 TN 的含量。

3 种物理性质指标可能对其养分形式有不同的影响,这一点可以从 3 个物理指标与不同养分、养分的不同形式(全量和有效量)的相关性分析结果看出。容重和孔隙度多与 SOC 和 TN 具有紧密相关关系(表 2 和表 3),而且逐步回归结果也进一步证明了这一点(表 4),但是比表面积对于土壤碳氮表征方面的作用很弱。多数情况下,本文所研究的 3 个物理指标多与 TN,TP,TK 总量相关性较高($R^2=0.058$),而与 AN,AP 和 AK 的相关性较弱($R^2=0.026$),且土壤容重与 TN 的相关程度最强($R^2=0.207$)。逐步回归结果也证明了这一点,3 个物理指标逐步回归结果中仅 AN 含量进入一次回归方程($B=0.000$),但是 TN 和 TK 等指标则多次进入了回归方程(表 4)。

我们的发现所具有的不确定性主要表现在 2 个方面。第一,土壤物理指标之间普遍存在较高的自相关性,这可能影响它们在指示土壤特征方面存在差异。这种自相关性主要体现在土壤容重与土壤孔隙度之间的相关性($R^2=0.25$),这是源于土壤的孔隙度是通过土壤比重和容重计算得来的,故而其之间的显著相关性是必然存在的。第二,3 种土壤物理性质指标与其他土壤指标的相关性均较低,最高 R^2 达到 0.24,因此有很大部分的差异不能够用物理性质差异去解释。尽管有很多土壤学的相关研究都发现了类似的低相关性。我们试图用大数据量来弥补这种缺憾,由于数据量多达 700 个以上,因此很多的相关性均达到了统计学显著水平,说明我们基于这些结果,得出相应的结论,所犯统计学错误的几率较小。

4 结论

(1) 土壤容重在指示土壤特征方面的作用可能更明显可靠。(2) 土壤比表面积越大,土壤持水能力越强;土壤容重值与土壤 SOC 含量密切相关;土壤孔隙度的大小对土壤 TN 含量可能产生影响。(3) 3 个物理指标多与全量养分相关性较高,而与养分有效量相关性较弱。结论显示土壤比表面积、容重、孔隙度 3 个物理指标对于其他土壤指标具有一定的指示作用,尤其表现在对全量养分的指示作用上。这也就说明这 3 种物理指标对于土壤质量的提升可能发挥着重要的作用,未来对于松嫩平原的土壤的研究中要充分考虑到这 3 种土壤物理指标所发挥的作用,对于该地区土壤的生态功能恢复重建更要考虑这 3 种土壤物理性质所发挥的积极作用。

参考文献:

[1] 徐晓嘉,雷国平,张慧,等. 黑龙江省松嫩平原南部表层

土壤肥力质量评价研究[J]. 水土保持研究,2010,17(5):268-272.

- [2] 程叶青,张平宇. 东北商品粮基地粮食生产的区域分异[J]. 自然资源学报,2005,20(6):925-931.
- [3] 纪仰慧,王晨轶,朱海霞,等. 松嫩平原土壤湿度时序变化特征[J]. 中国农学通报,2013,29(2):154-159.
- [4] 付微,李勇,李向越,等. 松嫩平原黑土区农田土壤肥力评价研究[J]. 土壤与作物,2012,1(3):166-174.
- [5] Wang Q, Wu Y, Wang W J, et al. Spatial variations in concentration, compositions of glomalin related soil protein in poplar plantations in northeastern China, and possible relations with soil physicochemical properties[J]. The Scientific World Journal, 2014:13. doi:10.1155/2014/160403.
- [6] 刘国栋,李瑛,张立,等. 松嫩平原耕层土壤固碳潜力估算[J]. 中国地质,2014,41(2):658-664.
- [7] 任春颖,张春华,王宗明,等. 松嫩平原玉米带农田表层土壤有机碳储量和固碳潜力研究[J]. 自然资源学报,2013,28(4):596-607.
- [8] 张春华,王宗明,任春颖,等. 松嫩平原玉米带土壤碳氮储量的空间特征[J]. 应用生态学报,2010,21(3):631-639.
- [9] 王博文,潘华,岳中辉,等. 不同盐碱化程度草地土壤肥力质量的季节动态特征[J]. 东北林业大学学报,2009,37(4):22-26.
- [10] Wang W J, He H S, Zu Y G, et al. Addition of HPMA affects seed germination, plant growth and properties of heavy saline-alkali soil in northeastern China: comparison with other agents and determination of the mechanism[J]. Plant and Soil, 2011,339(1/2):177-191.
- [11] 谷洪彪,宋洋,潘杰. 松嫩平原盐碱化形成影响因素研究进展[J]. 安徽农业科学,2010,38(30):16895-16898.
- [12] 依艳丽. 土壤物理研究法[M]. 北京:北京大学出版社,2009.
- [13] Schoenholtz S H, Miegroet H V, Burger J A. A review of chemical and physical properties as indicators of forest soil quality: challenges and opportunities[J]. Forest Ecology and Management, 2000,138(1/3):335-356.
- [14] 王夏晖,王益权, Kuznetsov MS. 黄土高原几种主要土壤的物理性质研究[J]. 水土保持学报,2000,14(4):99-103.
- [15] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京:中国农业出版社,2000.
- [16] 李会科,张广军,赵政阳,等. 渭北黄土高原旱地果园生草对土壤物理性质的影响[J]. 中国农业科学,2008,41(7):2070-2076.
- [17] 王群,尹飞,郝四平,等. 下层土壤容重对玉米根际土壤微生物数量及微生物量碳、氮的影响[J]. 生态学报,2009,29(6):3096-3104.
- [18] 王文杰,刘玮,孙伟,等. 林床清理对落叶松(*Larix gmelinii*)人工林土壤呼吸和物理性质的影响[J]. 生态学报,2008,28(10):4750-4756.
- [19] 刘小勇,李红旭,李建明,等. 不同覆盖方式对旱地果园水热特征的影响[J]. 生态学报,2014,34(3):746-754.