

大小兴安岭林区不同林型土壤养分综合评价

王芳^{1,2}, 黄玫², 孙希华¹, 龚亚珍³, 王军邦²

(1. 山东师范大学, 山东 济南 250014; 2. 生态系统网络观测与模拟重点实验室
中国科学院 地理科学与资源研究所, 北京 100101; 3. 中国人民大学 环境学院, 北京 100872)

摘要: 基于大小兴安岭地区主要林型野外采样数据, 利用统计学方法分析了红松林、针阔混交林、白桦林、樟子松林和蒙古栎林土壤有机质、全氮、速效磷和速效钾的垂直分布特征, 并对土壤养分状况进行了综合评价。结果表明, 不同林型土壤(0—40 cm)有机质、全氮、速效磷、速效钾养分含量差异显著。有机质、全氮、速效磷 3 种土壤养分的总体分布是白桦林、针阔混交林比较高, 针叶林次之, 蒙古栎林比较低; 而速效钾含量以蒙古栎林、白桦林为最高, 针阔混交林却比较低。用改进的内梅罗综合指数法进行综合评价, 结果显示, 大小兴安岭林区土壤有机质和全氮含量特别丰富, 速效磷含量为中等至较丰富, 不同林型土壤养分总体处于良偏优水平, 但速效钾比较缺乏, 成为该林区土壤质量的主要限制因素。

关键词: 大小兴安岭; 森林; 土壤养分; 土壤质量评价

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2013)01-0182-06

中图分类号: S157

Evaluation of Soil Nutrients for Different Forest Types in Xing'an Mountains Forest Area

WANG Fang^{1,2}, HUANG Mei², SUN Xi-hua¹, GONG Ya-zhen³, WANG Jun-bang²

(1. Shandong Normal University, Jinan, Shandong 250014, China; 2. Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Simulation, Institute of Geographical Sciences and Nature Resources, CAS, Beijing 100101, China; 3. School of Environment and Natural Resources, Renmin University of China, Beijing 100872, China)

Abstract: This study is based on the field data obtained for the main forest types in Xing'an mountains region, including coniferous forest, mixed forest, birch forest, pine forest and Mongolian oak forest. By using statistical method, the vertical distribution characteristics of soil organic matter, total nitrogen, available phosphorus and potassium are analyzed and the soil nutrient status is evaluated. Results indicate that the contents of soil organic matter, total nitrogen, available phosphorus and potassium are different significantly among various forest soil(0—40 cm) types. The contents of organic matter, total nitrogen and available phosphorus in the soils of birch forest and mixed forest are the highest, followed by that in coniferous forest and then Mongolian oak forest. The available potassium content in soils of the Mongolian oak forest and birch forest is the highest and in the mixed forest, the lowest. The improved Nemerow comprehensive index is used to evaluate soil quality. The results show that the contents of organic matter and total nitrogen are especially abundant in Xing'an Mountain forest soils, and the content of available phosphorus is in the medium to high level. The overall soil nutrient of the studied forests is in a relatively high level, but the content of available potassium is in a low level. Lack of available potassium has become a major limitation in this area.

Keywords: Xing'an mountains; forest; soil nutrient; comprehensive evaluation of soil quality

土壤是森林生态系统的重要组成部分, 是森林植被存在和发展的物质基础。它不仅供给林木生活所需的营养元素, 同时也供给林木水分, 为林木生长提

供支撑, 对森林的发育起着巨大的作用。大小兴安岭林区是我国最重要的林区之一, 也是我国北方的重要生态屏障, 研究其不同林型土壤养分特征对于了解该

收稿日期: 2012-07-23

修回日期: 2012-10-09

资助项目: 中国科学院战略性先导科技专项“应对气候变化的碳收支认证及相关问题”(XDA05050209); 国家重点基础发展规划项目“中国陆地生态系统碳源汇格局与驱动因素”(2010CB950603)

作者简介: 王芳(1986—), 女(汉族), 山西省左权县人, 硕士研究生, 研究方向为 GIS 的应用。E-mail: wangfang20070101@163.com。

通信作者: 黄玫(1968—), 女(壮族), 贵州省兴仁县人, 博士研究生, 副研究员, 研究方向是气候变化对生态系统影响的模拟以及生态系统碳循环模型研究。E-mail: huangm@igsnr.ac.cn。

林区森林与土壤的关系、土壤肥力的维持以及森林生态系统可持续发展具有重要意义。

陈志新等^[1]、姜春前等^[2]、刘鸿雁等^[3]对不同地区的森林土壤养分有过大量研究,但目前专门针对大小兴安岭地区不同林型土壤的养分特征的研究比较少。虽然渠开跃等^[4]研究了辽东山区不同林型土壤有机质和氮、磷、钾分布特征,王刚等^[5]研究了小兴安岭地区主要森林类型土壤理化性状特征,但没有对森林土壤养分状况进行综合评价。

本研究在大小兴安岭林区选取主要代表性林型进行大范围取样,选取土壤有机质、氮、磷和钾元素作为评价大小兴安岭林区土壤养分的主要指标,并分析了不同林型土壤各养分指标的分布特征,运用改进的内梅罗综合指数法对不同林型土壤的养分状况进行综合

评价。本研究可为该地区的森林经营管理提供参考。

1 研究区概况

研究区位于中国黑龙江省东北部,属温带大陆季风气候区,四季分明,冬季严寒、干燥而漫长,年平均气温为 $-1.15\sim-6.15\text{ }^{\circ}\text{C}$,年降水量在 $459.71\sim 572.93\text{ mm}$ 。地势呈西高东低,最高海拔 $1\ 514\text{ m}$ 。研究区森林类型是以红松为主的针阔混交林和针叶林,主要树种有红松、落叶松、樟子松、白桦、杨、榆等,藤条灌木遍布整个林区。主要土壤类型为暗棕壤。

本研究的采样点位于东经 $124^{\circ}22'$ — $129^{\circ}12'$,北纬 $48^{\circ}8'$ — $52^{\circ}45'$,海拔在 $181\sim 529\text{ m}$ 。采样点空间分布及采样点的基本信息如表 1 所示。根据地形坡度,一般在上位、中位和下位分别取样。

表 1 研究区土壤采样点概况

林型	优势树种	年均温/ $^{\circ}\text{C}$	降水量/mm	海拔/m	坡度/ $^{\circ}$	坡位	郁闭度	林种	林龄
红松林	红松林			463		上坡			
	樟子松,红松,马尾松	-1.15	572.93	434	20	中坡	0.95	原始林	过熟林
	红松林			379		下坡			
蒙古栎林	蒙古栎,柞树			196		中坡			
	蒙古栎	-2.15	509.28	181	20	下坡	0.7	次生林	成熟林
	蒙古栎			201		中坡			
针阔混交林 1	落叶松,白桦			190		平地			
	落叶松,白桦	-3.15	485.06	190	0~2	平地	0.5	次生林	成熟林
	落叶松,白桦			190		平地			
落叶松林	落叶松			318		平地			
	落叶松	-3.15	485.06	318	0~2	平地	0.9	次生林	成熟林
	落叶松			318		平地			
针阔混交林 2	白桦,樟子松,落叶松			312		中坡			
	白桦,樟子松,落叶松	-5.15	469.12	280	缓坡	下坡	0.8	次生林	成熟林
	白桦,樟子松,落叶松			312		中坡			
针阔混交林 3	白桦,樟子松,落叶松	-6.15	459.71	430	0~2	平地	1	过火林	幼林
	白桦,樟子松,落叶松			430		平地			
樟子松	樟子松	-6.15	459.71	529	缓坡	上坡	1	次生林	成熟林
	樟子松			529		上坡			
白桦林	白桦	-6.15	459.71	529	缓坡	上坡	1	次生林	中幼林
	白桦			529		上坡			

2 材料与方法

2.1 取样方法

根据不同林型选择典型的具有代表性的样地,在每个样地内按照梅花形布点原则设置 $2\sim 3$ 个采样点并分别取样,分 $0\sim 10,10\sim 20,20\sim 40\text{ cm}$ 这3个层

次取土,以环刀、塑料袋分别取样。带回实验室风干,挑根,研磨,过筛备用。同时调查了采样点的经纬度、林型、优势树种、郁闭度、地形(坡向、坡度等)、林龄等信息。

2.2 土壤化学性质的测定方法

土壤有机碳测定用重铬酸钾容量法—外加加热法;

全 N 含量用元素分析仪测定;速效 P 采用碳酸氢钠浸提,钼锑抗比色法测定;速效 K 测定采用醋酸铵浸提,火焰光度计测定。

2.3 数据处理

数据处理采用 Excel 进行统计分析,用 SPSS 软件进行多重比较。

2.4 土壤质量综合评价方法

2.4.1 评价指标的选取 一般认为土壤养分可以反映土壤质量的好坏,因而本研究选取土壤有机质、全氮、速效磷、速效钾作为土壤质量的评价指标^[1-13]。

2.4.2 评价指标分级标准 参照全国第二次土壤普查标准,并结合研究区实际情况,将土壤有机质、全 N、速效 P、速效 K 含量按照最小值、中间值和最大值分为 4 个级别(见表 2)。

2.4.3 评价方法 本文采用改进的内梅罗综合指数法^[7-9]对不同林型的土壤质量进行综合评价,土壤综合质量指数计算方法如式(1)所示:

$$Q = \sqrt{\frac{(P_i)^2 + (P_{i\min})^2}{2} \frac{(n-1)}{n}} \quad (1)$$

$$P_i = \begin{cases} X_i / X_{i\min} & (X_i \leq X_{i\min}) \\ 1 + (X_i - X_{i\min}) / (X_{imid} - X_{i\min}) & (X_{i\min} < X_i < X_{imid}) \\ 2 + (X_i - X_{imid}) / (X_{imax} - X_{imid}) & (X_{imid} < X_i < X_{imax}) \\ 3 & (X_i > X_{imax}) \end{cases} \quad (2)$$

式中: P_i ——分质量指数; X_i ——评价指标的测定值; $X_{i\min}$ ——“差”级分级标准; X_{imid} ——“中等”级分级标准; X_{imax} ——“良好”级分级标准; i ——评价指标($i=1,2,3,4$)。

土壤综合质量指数 Q 分级标准如表 3 所示。

表 3 土壤综合质量等级标准

土壤质量等级	I	II	III	IV
Q 的范围	$Q \geq 2$	$1.5 \leq Q < 2$	$1 \leq Q < 1.5$	$Q < 1$
质量评语	优	良	中	差

注:Q 为综合质量指数。

3 结果与分析

3.1 不同林型土壤有机质分布特征

图 1 为不同林型土壤有机质垂直分布特征。经统计发现,不同林型(0—40 cm)土壤有机质的分布为白桦林>针阔混交林 3>红松林>针阔混交林 1>樟子松林>落叶松林>针阔混交林 2>蒙古栎林,有机质含量依次为 188.61,111.66,82.86,80.39,75.51,71.71,42.57,32.93 g/kg。由此可知,受森林立地特征、优势树种的影响,不同林型枯落物总量、水分含量、物质组成和分解程度不同,导致各林型土壤有机质含量差异很大^[2]。

式中: Q ——土壤综合质量指数; \bar{P}_i ——参评各指标分质量指数的平均值; $P_{i\min}$ ——值最小的分质量指数; n ——参评指标总数。

表 2 土壤质量评价指标分级标准

土壤属性	$X_{i\min}$	X_{imid}	X_{imax}
有机质/(g·kg ⁻¹)	10	20	40
全氮/(g·kg ⁻¹)	1	1.5	2
速效磷/(mg·kg ⁻¹)	10	20	40
速效钾/(mg·kg ⁻¹)	100	150	200

式(1)中用 $P_{i\min}$ 代替了内梅罗公式中的 P_{imax} , 并加上修正项 $(n-1)/n$, 一方面主要为突出土壤属性因子中最差一个对土壤质量的影响,反映作物生长的最小因子律,另一方面,参评因子越多, $(n-1)/n$ 的值越大,可信度越高^[10]。

分质量指数 P_i 的计算方法如下^[11-12]:

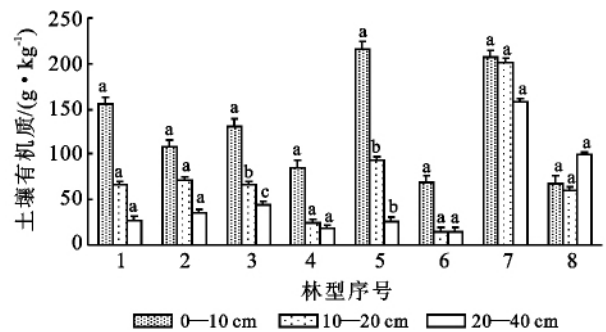


图 1 不同林型土壤有机质的垂直分布特征

注:1.红松林;2.落叶松林;3.针阔混交林 1;4.针阔混交林 2;5.针阔混交林 3;6.蒙古栎林;7.白桦林;8.樟子松林。同一林型土层间用不同小写字母表示土层间差异达到 0.05 显著性水平,相同小写字母标注时表示差异不显著。下同。

白桦林、针阔混交林 3 土壤有机质含量较高,蒙古栎林、针阔混交林 2 较低。白桦林正处于中林龄阶段,凋落物比较多,因此其土壤有机质含量较高;蒙古栎林土壤的有机质含量最少,比针阔混交林和针叶林还低很多,比较反常,分析其原因,除与植被有关外,

主要与地形和土壤的 pH 值有关,该地坡度较大,凋落物不易蓄积,加之土壤 pH 值比较高,使得蒙古栎的枯枝落叶很难分解^[6],不利于有机质的形成,最终导致蒙古栎林土壤有机质含量偏低。针叶林中,红松林的有机质含量比较高,主要是因为有机质的形成除与地形、植被类型有关外,还与人为活动有关,受管理措施的影响^[13],红松林属于原始天然林,人为影响比较少,土壤结构性好,有利于凋落物的蓄积及微生物活动,有利于土壤有机质形成,故红松林土壤的有机质含量偏高。

从图 1 可以看出,同一林型不同层次土壤的有机质含量分布不同,除了樟子松林外,各林型土壤有机质的垂直分布规律较为一致,即表层>亚表层>底层。主要原因是土壤表层通气性好,微生物量高,且枯落物较多,利于有机质的积累,而随着土层加深,土壤通气性下降,微生物减少,不利于土壤结构发展,养分循环较慢,因而土壤有机质含量显著低于表层^[4]。经多重比较发现,针阔混交林的土壤有机质表层大于下层,垂直分布有显著性差异($p < 0.05$);樟子松林是底层>表层>亚表层,但是其土壤有机质的垂直分布无显著性差异($p > 0.05$)。

3.2 不同林型土壤全 N 分布特征

图 2 为不同林型土壤全 N 垂直分布特征。经统计,各林型土壤(0—40 cm)全 N 分布规律与有机质的分布规律基本一致,排序为白桦林>针阔混交林 1>针阔混交林 3>红松林>落叶松林>樟子松林>针阔混交林 2>蒙古栎林,含量依次为:5.63,3.16,3.08,2.73,2.43,1.81,1.50,1.41 g/kg,白桦林土壤的全 N 含量最高,针阔混交林 2 和蒙古栎林最低。土壤全 N 分布规律与祖元刚等^[6]、姜春前等^[2]的研究结果基本一致。

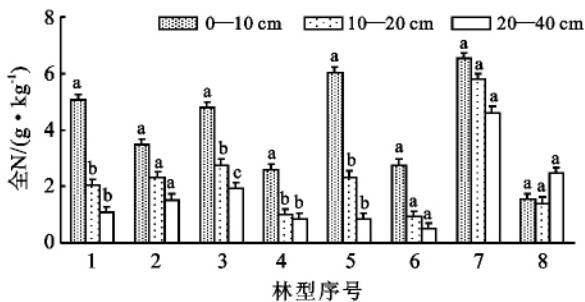


图 2 不同林型土壤全 N 垂直分布特征

由图 2 可见,各林型(樟子松林除外)土壤全 N 含量的剖面特征和有机质一样,呈表层>亚表层>底层的分布规律,分析是由于受地表枯落物影响,土壤肥力较高、结构性好、微生物量高,利于 N 素循环。

经多重比较分析得出,红松林、针阔混交林 2、针阔混交林 3 土壤的表层与亚表层和底层有显著性差异($p < 0.05$),针阔混交林 1 土壤的垂直分布有显著性差异,樟子松林土壤全 N 的垂直分布为底层>表层>亚表层,但是无显著性差异($p > 0.05$)。

针阔混交林 1、针阔混交林 3 的全 N 含量差异不显著,但针阔混交林 3 表层土壤的全 N 含量明显高于针阔混交林 1,而底层却比较少,主要是因为针阔混交林 3 处于幼林龄阶段。

3.3 不同林型土壤速效 P 分布特征

图 3 为不同林型土壤速效 P 垂直分布特征。经统计发现,不同林型土壤(0—40 cm)速效 P 分布为白桦林>针阔混交林 3>针阔混交林 1>樟子松林>落叶松林>红松林>针阔混交林 2>蒙古栎林,含量分别为 71.18,67.05,58.51,39.14,34.36,29.04,27.33,26.73 mg/kg。不同林型土壤速效 P 分布也与有机质相似,白桦林土壤的速效 P 含量最高,针阔混交林 2 和蒙古栎林最低,且除针阔混交林 2 和蒙古栎林外,呈白桦林>针阔混交林>针叶林的分布规律。

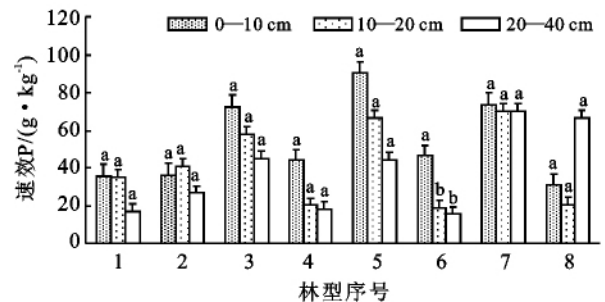


图 3 不同林型土壤速效 P 垂直分布特征

从图 3 可知,不同林型表层土壤(0—10 cm)速效 P 分布特征为针阔混交林 3>白桦林>针阔混交林 1>蒙古栎林>针阔混交林 2>落叶松林>红松林>樟子松林。不同林型的表层土壤速效 P 含量针阔混交林 3 最多,主要原因是该采样点 16 a 前过火的缘故。森林过火以后,表层土壤的速效 P 含量变化比较明显,随着时间的推移逐渐增多^[4]。针叶林中,樟子松林土壤的速效 P 含量比较高,但是其表层土壤的速效 P 含量却比较低,底层土壤的速效 P 含量几乎是表层的两倍,可能原因是 P 元素受土壤母质影响较大,而受植被、微生物等因素影响较小,在一定程度上影响速效 P 养分的缘故。

不同林型土壤速效 P 垂直分布情况如下:落叶松林是亚表层>表层,樟子松林为底层>表层>亚表层,白桦林的亚表层略小于底层,其他为表层>亚

层>底层,主要原因是凋落物通过养分释放使得土壤表层养分增加的同时,养分元素还会在土壤发生迁移,逐步进入表层以下的土壤,而 P 元素在土壤中不易发生迁移^[15],故速效 P 在表层土壤含量较高。多重比较结果显示:除蒙古栎林土壤的表层与亚表层、底层有显著性差异($p<0.05$)外,其他林型土壤速效 P 的垂直分布均无显著性差异。

3.4 不同林型土壤速效 K 分布特征

图 4 为不同林型土壤速效 K 的垂直分布特征。经统计,不同林型土壤(0—40 cm)的速效 K 的分布为蒙古栎林>白桦林>落叶松林>针阔混交林 2>樟子松林>针阔混交林 3>针阔混交林 1>红松林,含量依次为 212.96, 198.45, 168.18, 163.08, 160.33, 157.77, 157.27, 145.99 mg/kg。不同林型表层土壤(0—10 cm)速效 K 的分布特征为针阔混交林 3>蒙古栎林>白桦林>针阔混交林 1>针阔混交林 2>樟子松>红松林>落叶松林。垂直分布情况如下:针叶林 2 土壤速效 K 的垂直分布为亚表层>表层>底层,樟子松林的底层>亚表层,蒙古栎林的底层稍大于亚表层,其余为表层>亚表层>底层,且多重比较结果显示各林型土壤速效 K 的垂直分布均无显著性差异($p>0.05$)。

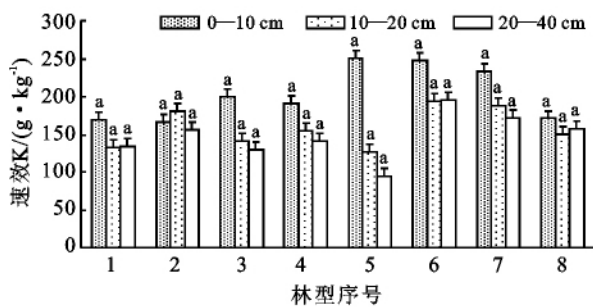


图 4 不同林型土壤速效 K 的垂直分布特征

分析结果表明,各林型土壤速效 K 含量的分布规律与有机质、全氮、速效磷明显不同,蒙古栎林、白桦林较高,而针叶林、针阔混交林的速效 K 含量差异不显著,其中落叶松林和樟子松林的含量稍高于针阔混交林。但是由各林型表层(0—10 cm)土壤速效 K 含量分布可知,表层土壤速效 K 含量除针阔混交林 3 外,符合阔叶林>针阔混交林>针叶林的规律,出现这种异常的原因,除与植被、郁闭度和地形有关系外,主要与土壤母质有很大关系。

多重分析结果显示土壤速效 K 含量的剖面特征不显著,这是因为 K 为极易迁移元素^[16],速效 K 很容易迁移到亚表层和底层,因而其剖面特征不显著。

3.5 不同林型土壤质量综合评价

表 4 表示不同林型土壤质量评价分指数和综合指数。由表 4 看到,不同林型土壤质量综合指数变幅为 1.621~2.235,介于优和良之间,平均为“良”(1.865),其中白桦林土壤的综合质量属于“优”级(2.235),其余林型土壤质量综合评价均处于“良”,说明兴安岭地区不同林型土壤质量总体处于良偏优水平。土壤质量综合指数由高到底依次为白桦林、针阔混交林 3、落叶松林、针阔混交林 1、樟子松林、针阔混交林 2、红松林、蒙古栎林。

表 4 不同林型土壤质量评价分指数和综合指数

林型	有机质	全 N	速效 P	速效 K	综合质量指数
红松林	3	3	2.452	1.930	1.715
落叶松林	3	3	2.718	2.364	1.931
针阔混交林 1	3	3	3	2.145	1.865
针阔混交林 2	3	2.004	2.367	2.262	1.752
针阔混交林 3	3	3	3	2.356	1.956
白桦林	3	3	3	2.969	2.235
蒙古栎林	2.643	1.825	2.336	3	1.621
樟子松林	3	2.623	2.957	2.207	1.848

从表 4 还可以看出,兴安岭林区土壤质量普遍受到速效 K 和速效 P 含量的限制,其中红松林主要是受速效 K 的限制,蒙古栎林主要受全 N 的限制。

4 结论

(1) 0—40 cm 针阔混交林土壤的有机质含量为 42.57~111.66 g/kg,全氮含量为 1.50~3.16 g/kg,速效磷为 27.33~67.05 mg/kg,速效钾为 157.27~163.08 mg/kg;针叶林土壤的有机质含量为 71.71~82.86 g/kg,全氮含量为 1.81~2.73 g/kg,速效磷为 29.04~39.14 mg/kg,速效钾为 145.99~168.18 mg/kg。

(2) 除樟子松林外,各林型土壤的有机质、全氮垂直分布均为表层>亚表层>底层,但多重比较结果显示,樟子松林、白桦林、蒙古栎林、针叶林土壤有机质、全氮的垂直分布无显著性差异,针阔混交林的垂直分布大都有显著性差异,各林型土壤速效磷(蒙古栎林除外)、速效钾的垂直分布均没有显著性差异。

(3) 大小兴安岭林区有机质和全氮含量特别丰富,有效磷含量为中等至较丰富,不同林型土壤质量总体处于良偏优水平,但土壤速效钾比较缺乏,成为该地区土壤质量的主要限制因素。

致谢:黑龙江省森林防火办王志成博士,中国科学院地理资源所的研究生李雷、孙向阳、王昭生、商贵

铎、岳溪柳、夏芹参与了本研究的野外采样工作,为本研究的顺利完成提供了大力支持,在此一并表示衷心的感谢!

[参 考 文 献]

- [1] 陈志新,王若森,宋森,等.伊春林区典型阔叶林红松林下土壤理化性状分析[J].林业勘查设计,2010(4):73-75.
- [2] 姜春前,徐庆,姜培坤.不同森林植被下土壤化学和生物化学肥力的综合评价[J].林业科学研究,2001,15(6):700-705.
- [3] 刘鸿雁,黄建国.缙云山森林群落次生演替中土壤理化性质的动态变化[J].应用生态学报,2005,16(11):2041-2046.
- [4] 渠开跃,代力民,冯慧敏,等.辽东山区不同林型土壤有机质和 NPK 分布特征[J].土壤通报,2009,40(3):558-562.
- [5] 王刚,孙清芳,孙延坤,等.小兴安岭地区主要森林土壤理化性状特征研究[J].林业科技,2011(2):15-16.
- [6] 祖元刚,李冉,王文杰,等.我国东北有机碳、无机碳含量与土壤理化性质的相关性[J].生态学报,2011,31(18):5207-5216.
- [7] 阚文杰,吴启堂.一个定量综合评价土壤肥力的方法初探[J].土壤通报,1994,25(6):28-30.
- [8] 邓南荣,吴志峰,刘平,等.城市园林绿化用地土壤肥力诊断与综合评价[J].土壤与环境,2000,9(4):287-289.
- [9] 周清明,赵杰.城乡结合部土壤质量变化特点与可持续利用对策[J].地理学报,2000,55(5):545-553.
- [10] 单启华,俞元春,张建峰,等.城市森林土壤肥力质量综合评价[J].水土保持通报,2009,29(4):186-190.
- [11] 王效举,龚子同.亚热带小区域水平上土壤质量时空变化的定量评价[J].热带亚热带土壤科学,1996,5(4):229-231.
- [12] 吴志峰,文雅,张坚.广州市长虹苗圃的土壤质量评价[J].中国园林,2001(5):70-71.
- [13] 宋霞,刘允芬,徐小锋,等.红壤丘陵区人工林冬春时段碳、水、热通量的观测与分析[J].资源科学,2004,26(3):96-105.
- [14] 宋启亮,董希斌,李勇,等.采伐干扰和火烧对大兴安岭森林土壤化学性质的影响[J].森林工程,2010,26(5):4-7.
- [15] 林开敏,章志琴,邹双全,等.杉木与阔叶树凋落物混合分解对土壤性质的影响[J].土壤通报,2006,37(2):258-262.
- [16] 赵其国,王明珠,何圆球.我国亚热带森林凋落物及其对土壤的影响[J].土壤学报,2000,7(3):8-161.
- [7] Wild M, Gilgen H, Andreas R, et al. From dimming to brightening: Decadal changes in solar radiation at earth's surface[J]. Science, 2005,308(7):847-850.
- [8] Power H C. Trends in solar radiation over Germany and an assessment of the role of aerosols and sunshine duration [J]. Theoretical and Applied Climatology, 2003,76(1/2):47-63.
- [9] Kaiser D P, Qian Y. Decreasing trends in sunshine duration over China for 1954—1998: Indication of increased haze pollution [J]. Geophysics Research Letter, 2002,29(21):2042-2045.
- [10] 徐宗学,和宛琳.近 40 a 黄河源区气候要素分布特征及变化趋势分析[J].高原气象,2006,25(5):906-913.
- [11] 郭军,任国玉.天津地区近 40 a 日照时数时数变化特征及其影响因素[J].气象科技,2006,34(4):415-430.
- [12] 何彬方,冯妍,荀尚培,等.安徽省 50 年日照时数时数的变化特征及影响因素[J].自然资源学报,2009,24(7):1275-1285.
- [13] 华维,董一平,范广州,等.青藏高原年日照时数变化的时空特征[J].山地学报,2010,28(1):21-30.
- [14] 吴林荣,王娟敏,刘海军,等.陕西省太阳辐射及其日照时数的时空变化特征[J].水土保持通报,2010,30(2):212-214.
- [15] 陈少勇,张康林,邢晓宾,等.中国西北地区近 47 a 日照时数的气候变化特征[J].自然资源学报,2010,25(7):1142-1152.
- [16] 王伟,王玉,李缠云,等.黄土丘陵沟壑区气候与气候生产力变化分析:以延安市为例[J].水土保持通报,2008,28(6):151-154.
- [17] 董亚非,李兆元.关中地区气候资源特征分析[J].陕西气象,1995(6):34-36
- [18] 孙静,阮本清,蒋任飞.宁夏引黄灌区参考作物蒸发蒸腾量及其气候影响因子的研究[J].灌溉排水学报,2006,15(1):53-57.
- [19] 毛飞,卢志光,郑凌云,等.近 40 a 那曲地区日照时数和风速变化特征[J].气象,2006,23(9):77-83.
- [20] 任国玉,王文,朱临洪,等.黄土高原地区太阳辐射时空演变特征[J].气候与环境研究,2008,13(1):61-66.
- [21] 刘卫平,魏文寿,唐湘玲.阿克苏地区近 45 a 日照时数变化特征[J].干旱区地理,2008,31(2):197-202.
- [22] 魏凤英.现代气候统计诊断与预测技术[M].北京:气象出版社,1999:41-47.
- [23] 吴洪宝,吴蕾.气候变率诊断和预测方法[M].北京:气象出版社,2005:106-127.

(上接第 181 页)