

# 甘肃兴隆山自然保护区森林演替对土壤肥力影响的评价

曹靖,陈琦,常雅军,苗晶晶,王婧

(兰州大学 生命科学学院干旱与草地生态教育部重点实验室,兰州 730000)

**摘要:**以黄土高原半干旱区森林群落为研究对象,从土壤物理、化学和生物化学因子出发,利用模糊数学和因子分析方法对甘肃兴隆山植物群落演替过程土壤肥力的变化特征进行了综合评价。结果表明:4 类林分土壤综合质量由高到低依次是落叶阔叶林、针阔混交林、灌木林、针叶林。证明随着森林群落演替进展,土壤肥力呈降低趋势。解决当前该区针叶林土壤退化的主要措施是利用人为干扰来控制生态演替,以维持地力平衡和提高林地生产力。

**关键词:**森林演替;土壤肥力;土壤质量综合指标;兴隆山

中图分类号:S153.6

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2009)04-0089-05

## Assessment on Effects of Forest Succession on Soil Fertility in Xinglongshan Mountain National Nature Reserve, Gansu Province

CAO Jing, CHEN Qi, CHANG Ya-jun, MIAO Jin-jin, WANG Jing

(School of Life Science, Key Laboratory of Arid and Grassland Ecology, Ministry of Education, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** The study was conducted under succession forest communities in semi-arid region of the Loess Plateau, Gansu province. Based on the analyses of soil physical, chemical and biological properties, this study assessed comprehensively the variation characteristics of soil fertility at the secondary succession stage of plant communities in Xinglong Mountain by using fuzzy mathematics and factor analysis. The results showed that values of integrated soil fertility index in four types of forest increased in the order of broad-leaved forests > coniferous and broad-leaved mixed forests > shrub vegetation > coniferous forests, suggesting that soil fertility decreased with successive development. The main measure to prevent soil degradation in coniferous forests in this area is to dominate the ecological succession by anthropocentric disturbance practice in order to maintain the soil fertility balance and enhance forest productivity.

**Key words:** forest succession; soil fertility; integrated soil quality index; Xinglongshan Mountain

## 1 引言

兴隆山国家级自然保护区是甘肃中部半干旱黄土高原的森林绿岛之一,它在改善周边环境,涵养水源,保持水土,调节区域气候等方面起着十分重要的作用<sup>[1]</sup>,是该地区生态平衡的重要物质基础。20 世纪 40 - 50 年代,该保护区的森林遭受人类大规模的砍伐,兴隆山保护区建立后,各种演替阶段的森林均得到有效保护,在 20 世纪 80 - 90 年代末保护区内还营造了近 3 300 hm<sup>2</sup> 的速生丰产的落叶松纯林。处于半干旱黄土高原的兴隆山现具有不同森林群落演替系列,形成的主要 3 类演替阶段的森林

是:落叶阔叶林、针阔混交林和针叶林,其中阔叶林为演替的早期阶段,针阔混交林为过渡阶段,针叶林为顶级阶段<sup>[2]</sup>。植物群落演替过程是植物与土壤相互影响和相互作用的过程,植物群落的变化总是与土壤的演化相关联,土壤的分异会导致植被的变化,植被的变化影响着土壤肥力发育<sup>[3-5]</sup>。目前,早期和过渡演替阶段的森林由于人为干扰有向顶级群落发展的趋势,演替进程的变化对兴隆山自然保护区土壤肥力的影响如何,还未见报道。研究了黄土高原半干旱区森林群落演替过程中土壤肥力的演变过程和空间分布特征,运用综合评价方法分析了该区植物群落演替与土壤肥力的关系,对演替各阶段土壤

\* 收稿日期:2009-01-15

基金项目:国家自然科学基金项目(30671666);国家基础科学人才培养基金项目(J0630644);教育部骨干教师基金

作者简介:曹靖(1968-),甘肃灵台人,女,博士,副教授,从事土壤-植物生态学方面的教学和科研工作。E-mail:caojing@lzu.edu.cn

肥力进行多因子综合比较,以期探索半干旱黄土高原的森林群落演替过程对土壤肥力的影响与变化机制,为保护和选择适合该区生态环境的植被类型提供科学依据。

2 研究地区与研究方法

2.1 自然概况

甘肃省兴隆山国家级自然保护区位于榆中县西南隅(103°50′ - 104°10′ E,35°38′ - 35°58′ N)属祁连山的东延余脉。保护区总面积约 33 301 hm<sup>2</sup>,占榆中县总土地面积的 10.1%。保护区地处东亚大陆内地,大陆性气候明显、四季分明、水热同季,保护区内年均温 3~7℃,年均降雨量 621.6 mm,降水多集中在 7 - 9 月,约占全年降水量的 55%左右,平均蒸发量为 918.4 mm,相对湿度 68%,干燥度 0.65,无霜期 168 d 左右。研究区主要土壤类型是石灰性褐土,质地为粉沙壤土。研究地具体情况见表 1。

2.2 研究方法

2006 年 6 月初进行土壤取样。在每个林地内随机设置 1 m ×1 m 样方 20 个,分层(0 - 15,15 - 30,30 - 50 cm)挖取土壤剖面,然后将同一样地相同土层的样品混合后取 2 kg,将一部分新鲜土壤在 0~4℃保存用于土壤酶活性的测定;另一部分土壤风干后用来测定土壤基本理化性状。

样品风干后剔除杂质,磨碎过筛,装袋贮藏备用。土壤基本理化性状按常规分析方法测定<sup>[6]</sup>:土壤有机质采用重铬酸钾容量法测定;碱解扩散法测定水解氮;速效磷采用 NaHCO<sub>3</sub> 浸提,钼锑抗比色法测定;速效钾采用 NH<sub>4</sub>OAc 浸提,火焰光度法测定;阳离子交换量(CEC)采用醋酸铵法。土壤全氮用 C - N 分析仪(Thermo JARRELL Ash)测定。

田间持水量采用环刀法;pH 值用 1:5 土液比浸提,酸度计测定。脲酶活性采用苯酚 - 次氯酸钠比色法,酶活性单位:脲酶[NH<sub>3</sub> - N mg/(g ·24 h)];过氧化氢酶活性测定采用高锰酸钾容量法<sup>[7]</sup>。

2.3 土壤质量评价方法

由于反映土壤肥力的各个因子具有连续性性质,采用模糊隶属度函数计算各演替阶段土壤肥力因子的隶属度值,并根据各因子对土壤肥力影响的正负相关性,确定隶属度函数分布的升降性<sup>[4]</sup>。

对土壤容重和 pH 值采用降型分布函数:

$$F(x_i) = (X_{imin} - X_i) / (X_{imax} - X_{imin}) \tag{1}$$

对土壤其它物理、化学或生物学因子采用升型分布函数:

$$F(x_i) = (X_i - X_{imin}) / (X_{imax} - X_{imin}) \tag{2}$$

式中:  $F(x_i)$  ——土壤各因子的隶属度值;  $x_i$  ——土壤各因子的值,  $X_{imax}$ ,  $X_{imin}$  ——第  $i$  项土壤因子中的最大值和最小值。

由于各个因子对土壤肥力影响的程度不同,所以通常用权重系数来表示各个因子的重要程度。选择具有代表性和对植被影响较大的肥力指标,然后对选择指标采用 SPSS13.0 软件进行因子分析,计算各肥力因子主成分的贡献率和累计贡献率;根据各指标值之间的相关系数大小确定各指标的权重系数( $W_{ii}$ )<sup>[8-9]</sup>。根据模糊数学中的加乘法原则,加权计算各演替阶段土壤肥力综合指标值 IFI(Soil integrated fertility index)<sup>[4,10,11]</sup>,其值由隶属度值和权重系数来决定,采用式(3)来计算。

$$IFI = (F_i \times W_i) \tag{3}$$

式中:  $F_i$  ——第  $i$  项土壤肥力因子的隶属度值;  $W_i$  ——第  $i$  项土壤肥力因子的权重系数。IFI 取值为 0~1 之间,其值越高,表明土壤肥力质量越好。

表 1 研究地点概况

林型	林龄/ a	海拔/ m	北纬	东经	坡度/ (°)	凋落物 厚度/cm	林冠郁 闭度	优势物种
灌木林	18~23	2358	35°46′80″	104°02′76″	26	2.8	0.68	黄刺玫( <i>Rosa xanthina</i> )、栒子( <i>Cotoneast acutifolia</i> )、沙棘( <i>Hippophae rhamnoides</i> )、虎榛子( <i>Ostryopsis davidiana</i> )
针阔混交林	21~25	2311	35°48′17″	104°03′87″	24	3.6	0.83	青杆( <i>Picea wilsonii</i> )、山杨( <i>Populus davidiana</i> )、白桦( <i>Betula platyphylla</i> )
阔叶林	24~28	2306	35°46′81″	104°03′01″	23	4.2	0.92	山杨、白桦、辽东栎( <i>Quercus liaotungensis</i> )
针叶林	22~25	2345	35°46′69″	104°02′78″	10	3.0	0.80	落叶松( <i>Larix gmelinii</i> )

3 结果与分析

3.1 不同林型对土壤理化性质的影响

土壤持水量的高低反映了土壤本身蓄水能力的

大小,落叶阔叶林 0 - 30 cm 土层的土壤持水量明显高于其它森林类型(表 2),分别为 56.3%和 45.6%,有效提高了土壤的持水性能,其次是针阔混交林,而针叶林的则低于其它植被类型。落叶阔叶林土壤容

重最小,混交林次之,灌木林和针叶林之间差异不明显。研究区土壤偏碱性,土壤 pH 随土层深度的增加而增加,不同森林类型调节了土壤酸碱度,尤其表层土(0 - 15 cm)pH 值变化较明显,在 7.87~8.15;针叶林各土层的 pH 值均低于其它林型,尤其 0 - 15 cm 土层 pH 值下降较显著,可能针叶林的残落物与阔叶的相比含单宁、木质素、树脂等较多,产生多种酸性较

强的物质,形成了较多的腐殖酸而导致 pH 值降低<sup>[12]</sup>;另外,针叶树容易吸收铵态氮,当铵态氮被吸收后植物根系会释放等量的 H<sup>+</sup>,使针叶林下土壤酸化<sup>[13]</sup>,这种土壤酸性增加,一方面可能造成无机营养元素淋溶作用加剧,土壤养分状况恶化,最终使生产力降低;另一方面,这种变化对钙质土壤来说有利于植被对土壤难溶性磷和矿质养分的吸收和利用。

表 2 不同森林演替阶段土壤肥力因子(平均值)

林型	土层/ cm	pH 值	土壤容重/ (g·cm <sup>-3</sup> )	田间持 水量/%	有机质/ (g·kg <sup>-1</sup> )	全氮/ (g·kg <sup>-1</sup> )	水解氮/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	速效磷/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	速效钾/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	CEC/ (cmol·kg <sup>-1</sup> )	脲酶活性/ (mg·g <sup>-1</sup> )	过氧化氢酶活性/ (mg·g <sup>-1</sup> )
灌木林	0 - 15	8.13	1.18	46.5	29.8	3.82	135.6	17.6	228.4	32.4	0.68	4.80
	15 - 30	8.24	1.25	32.4	20.6	3.11	109.3	8.0	203.5	22.5	0.47	4.31
	30 - 50	8.35	-	-	9.1	1.64	-	5.6	-	-	0.32	3.43
针阔混交林	0 - 15	8.15	1.16	52.3	37.6	4.66	147.8	16.8	233.4	34.7	0.84	5.05
	15 - 30	8.25	1.21	39.2	24.3	3.24	118.7	8.2	210.9	25.2	0.61	4.42
	30 - 50	8.35	-	-	11.7	2.03	-	5.8	-	-	0.34	3.41
落叶阔叶林	0 - 15	7.96	1.07	56.3	52.4	5.75	158.4	15.5	232.6	39.6	0.98	5.21
	15 - 30	8.18	1.15	45.6	31.2	4.16	136.8	8.8	204.1	30.4	0.71	4.57
	30 - 50	8.31	-	-	12.5	2.14	-	6.1	-	-	0.35	3.46
针叶林	0 - 15	7.87	1.19	38.6	28.1	3.48	126.2	19.5	222.6	27.5	0.61	4.64
	15 - 30	8.01	1.25	27.8	14.3	2.34	91.4	11.1	197.3	20.3	0.36	4.22
	30 - 50	8.26	-	-	8.8	0.94	-	5.8	-	-	0.24	3.21

3.2 不同林型对土壤肥力因子和土壤酶活性的影响

森林生态系统中凋落物是土壤有机质和养分的主要补给者。不同森林类型的枯枝落叶数量和质量有较大差异,森林枯枝落叶通过分解使大量的营养元素归还给土壤,对维持土壤肥力起到了十分重要的作用<sup>[14-15]</sup>。从表 2 看出,不同林型土壤有机质含量随着土层深度的增加,呈明显的降低趋势,各层土壤有机质含量表现为阔叶林>混交林>灌木林>落叶松纯林,阔叶林和混交林表层(0 - 15 cm)土壤有机质分别是针叶纯林的 1.86,1.34 倍,表下层(15 - 30 cm)分别是针叶纯林的 1.18,1.70 倍,表明针叶纯林不利于土壤养分库的增加。全 N 和水解 N 含量在不同林地下的表现同有机质基本一致。4 类林分土壤有效 P 含量呈表聚现象,表层土壤有效 P 含量则是阔叶林最低,为 15.5 mg/kg,这可能是土壤速效磷因及时供给树木生长需求,从而造成了土壤有效磷含量不高,表明在该林型中土壤有效磷主要以消耗过程为主;而落叶松土壤有效磷含量较高为 19.5 mg/kg,其原因可能是由于土壤 pH 值的显著降低而使土壤难溶性磷溶解,增加了土壤有效磷的含量。土壤中 K 素主要来源于母质,0 - 30 cm 土层土壤速效钾含量在 233.4~197.3 mg/kg 变化,除针叶林较低外,其它林型之间土壤速效钾含量差异不十分明显,针叶林土壤中钾素含量较低,是由于

在研究的几种群落中,针叶林凋落物分解最慢<sup>[16]</sup>,可能导致其养分归还率较低所致。土壤阳离子交换量(CEC)是反映土壤保持养分和提供养分能力的重要指标,阔叶林和混交林表层土壤 CEC 与落叶松纯林相比(表 2),分别提高了 30%和 21%,表明针叶树林地不利于各层土壤肥肥能力的改善。

土壤酶是反映土壤质量的重要指标。土壤脲酶能促进土壤中酰胺态 N 的水解,生成的氨是植物氮素的营养来源之一<sup>[7]</sup>;过氧化氢酶与土壤的呼吸活动和土壤微生物的活动有密切关系,其活性可以反映土壤的呼吸强度<sup>[17]</sup>。从表 2 来看,4 类林分中落叶阔叶林土壤总体上酶活性最强,针叶林土壤酶活性最弱,针阔混交林和灌木林居中。从各类酶分析可以看到,4 类林分表层土壤脲酶活性差异显著,各剖面中土壤表层酶活性大于表下层,阔叶林表层土壤脲酶活性很强,可能是因为阔叶一般具有氮素含量高、分解速率快的特点,凋落物较快的分解速率又进一步促进了土壤脲酶催化底物量的提高,增加了土壤微生物所需营养物质的来源<sup>[18]</sup>。落叶阔叶林表层土壤过氧化氢酶活性显著高于针叶林;除阔叶林外,其余林型土壤剖面各层次之间过氧化氢酶活性差异不显著,表明土壤过氧化氢酶活性在该区对于不同植被响应不十分明显。

表 3 不同森林群落演替阶段土壤肥力因子的隶属度值

土壤肥力因子	土层/ cm	pH 值	容重	田间 持水量	有机质	全氮	水解氮	速效磷	速效钾	CEC	脲酶 活性	过氧化 氢酶活性
灌木林	0 - 15	0.316	0.389	0.657	0.405	0.434	0.660	0.833	0.795	0.679	0.504	0.586
	15 - 30	0.026	0.000	0.162	0.164	0.226	0.267	0.000	0.159	0.167	0.166	0.094
针阔混交林	0 - 15	0.263	0.500	0.861	0.608	0.680	0.842	0.766	0.923	0.749	0.770	0.838
	15 - 30	0.000	0.222	0.400	0.261	0.264	0.407	0.017	0.349	0.257	0.399	0.263
落叶阔叶林	0 - 15	0.763	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.651	1.000	1.000	1.00	1.000
	15 - 30	0.184	0.556	0.625	0.441	0.534	0.678	0.065	0.171	0.525	0.565	0.453
针叶林	0 - 15	1.000	0.333	0.376	0.360	0.334	0.519	1.000	0.648	0.375	0.415	0.424
	15 - 30	0.632	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.262	0.000	0.000	0.000	0.000

表 4 土壤肥力因子主成分的贡献率

主成分	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6	Z7	Z8	Z9	Z10	Z11
贡献率/ %	56.14	15.15	13.19	11.39	1.22	0.71	0.62	0.61	0.52	0.33	0.13
累计贡献率/ %	56.14	71.29	84.47	95.86	97.08	97.79	98.41	99.02	99.54	99.87	100.0
特征值	6.18	1.67	1.45	1.25	0.13	0.08	0.07	0.07	0.06	0.04	0.01

表 5 土壤肥力因子的相关系数均值和权重

肥力因子	pH 值	土壤 容重	田间 持水量	有机质	全氮	水解氮	速效磷	速效钾	CEC	脲酶 活性	过氧化 氢酶活性
相关系数平均值	0.255	0.745	0.747	0.761	0.739	0.725	0.502	0.685	0.752	0.727	0.554
权重系数	0.035	0.104	0.104	0.106	0.103	0.101	0.070	0.095	0.105	0.101	0.077

3.3 土壤质量演化的综合评价

土壤质量综合指数是反映土壤质量的相对数值,根据公式(1)和式(2),计算得出不同林型土壤质量因子的隶属度值(表 3)。利用主成分分析方法得到各因子主成分的方差贡献率、累计贡献率和特征值(表 4),其中,第一主成分(Z1)对土壤质量的贡献最大,3 个主成分的累积方差贡献率已达 84.47 %,可以综合反映出原来所有肥力要素的绝大部分变异信息。表 4 主成份 Z1 包括土壤有机质、土壤氮素因子、土壤持水量、阳离子交换量、脲酶活性和土壤容重;第二主成份(Z2)包括土壤磷素、土壤钾素因子;第三主成份(Z3)包括土壤酸碱度(pH 值)因子;第四主成份(Z4)包括土壤过氧化氢酶活性。然后再根据各肥力因子间的相关系数,求出单项肥力指标的权重系数(表 5)。

根据公式(3)计算得出不同森林演替阶段土壤肥力综合指数(图 1),该指标反映的综合信息较理想地反映了不同森林植被下土壤肥力演化方向与程度。图 1 表明,不同森林植被演替阶段对土壤肥力有显著的影响,无论是表层还是表下层土壤肥力综合指标值均是:阔叶林 > 针阔混交林 > 天然灌丛林 > 落叶松纯林,说明不同森林植被的枯落物对于维护其土壤的自肥能力具有较大的差异,也表现出随着植物群落次生演替的进展土壤肥力有降低的趋

势。这个结果和前文单项肥力因素分析结果较吻合,证明了采用土壤质量综合评价方法来分析不同植被下土壤肥力状况是较为理想的。

落叶阔叶林林地的土壤肥力综合指数值较高,这与阔叶林群落的微环境有密切的关系。在森林生态系统中,土壤有机质和养分的积累主要受凋落物和细根的影响<sup>[5,14]</sup>,阔叶林由于凋落物量大且易分解,物种组成复杂,从而造成其代谢途径和代谢产物的多样性,因此,与其它林分相比产生了较高的土壤有机质含量及其它养分水平<sup>[14,19]</sup>,土壤理化性质得到明显改善,养分大量积累(表 2);阔叶林 15 - 30 cm 土层的肥力综合指数值为 0.467,大约与针叶林表土层(0.479)的相近(图 1),说明促进了林下土壤肥力的形成和发育。针叶林的土壤肥力综合指数值最低(图 1),一方面表明落叶松纯林由于凋落物较少且分解缓慢,随着时间的延续,有机质累积速度较慢,营养元素释放缓慢,土壤肥力耗损大于归还,导致林地自肥能力减弱,土壤肥力有所降低<sup>[20-21]</sup>;另一方面,落叶松人工林树种层次单一,群落结构简单,土壤动物和微生物数量减少,分解量下降,致使凋落物积累与分解不相协调,削弱了系统的自肥能力<sup>[22]</sup>。针阔混交林和灌草丛样地的土壤肥力综合指数值则位于它们之间,混交林土壤肥力质量较高主要是由于凋落物输入量比落叶松纯林大,凋落物多样性增加,

凋落物层的分解率逐步提高,加速了凋落物中营养物质的释放和归还,提高了土壤肥力<sup>[23-24]</sup>。该自然保护区内,灌木林地的综合土壤质量值高于落叶松人工纯林,一方面与林地群落中的物种丰富度高(表 1)有关,如沙棘这种非豆科固氮树种具根瘤,能固定空气中的氮,根系发达,可能增加了土壤中 N 和有机质含量;另一方面是由于一些灌木其叶小而薄,易于分解,加速了系统内养分循环,使土壤肥力不断提高<sup>[19]</sup>,说明在该生态区域内多样性的灌丛林地也有利于土壤肥力的改善和提高。

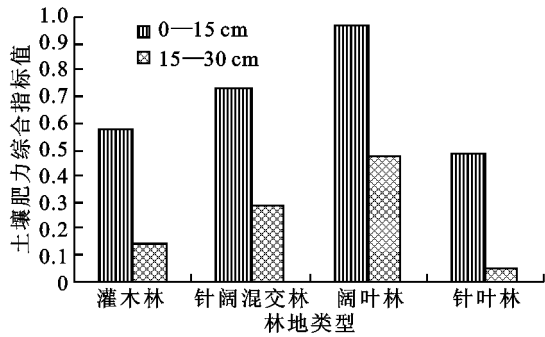


图 1 不同森林类型的土壤肥力综合指数

4 结论与讨论

从土壤综合肥力指数来看,阔叶林 > 针阔混交林 > 天然灌丛林 > 落叶松纯林,表明阔叶树林和针阔混交 2 种林型生态系统能对林地土壤质量的维持和保护水源产生积极的影响,而营造针叶纯林会导致土壤质量下降,不利于持续的土地生产力和水土保持的功能。

土壤肥力是植物演替过程的重要驱使因素。许多学者对各种森林类型和森林不同演替阶段对土壤肥力的影响进行了综合评价,大多研究表明,土壤肥力综合指标值表现为阔叶林 > 针阔混交林 > 针叶纯林<sup>[5,15]</sup>,虽然同一森林类型的不同树种如阔叶树之间或针叶树之间或针阔混交模式上土壤肥力增减幅度存在差异<sup>[4,26-27]</sup>。在本研究中,灌木林表层土壤(0 - 15 cm)肥力综合指标值(0.575)稍高于针叶林(0.479),这一结果与张庆费等和宋会兴等对针叶林(马尾松纯林)土壤肥力综合指标值大于灌木林的结论有所不同,这与本研究所选择的针叶树种不同和灌木林群落中的物种组成有关,这些因素对土壤肥力质量的影响差异较大。由此,可见在该生态区域内多样性的灌丛林对地力的维持效果可能比针叶纯林好。

总之,随着森林群落演替过程的进行,土壤肥力有所下降。当前,解决黄土高原半干旱森林绿岛中人工针叶林土壤退化的主要措施应该是因地制宜地建造多样性的森林植被类型,尽量缩小营造针叶纯

林面积。从土壤肥力、涵养水源和水土保持、土地生产力以及经济效益几个方面综合考虑,建议首先要加强对阔叶林的保护,通过适度调整群落结构,增加林地阔叶树种类;营造良好的针阔混交模式,增加凋落物多样性,调节针叶纯林凋落物分解与积累的矛盾,增加养分归还量,以维持地力平衡和提高林地生产力。从保护半干旱黄土高原森林资源整体来看,还须利用人为干扰来控制生态演替,保证每个演替阶段都具备一定的森林面积,以增加系统的多样性和稳定性。

参考文献:

[1] 王香亭. 甘肃兴隆山国家级自然保护区资源本底调查研究[M]. 兰州:甘肃民族出版社,1996.

[2] 赵成龙,陶继新,邵明勤,等. 兴隆山国家级自然保护区鸟类群落初报[J]. 甘肃林业科技,2005,30(4):15-16.

[3] 张全发,郑重,金义兴. 植物群落演替与土壤发展之间的关系[J]. 武汉植物学研究,1990,8(4):325-334.

[4] 张庆费,宋永昌,由文辉,等. 浙江天童植物群落次生演替与土壤肥力变化研究[J]. 生态学报,1999,19(2):174-178.

[5] 欧阳学军,黄忠良,周国逸,等. 鼎湖山亚热带森林群落演替对土壤化学性质影响的累积效应研究[J]. 水土保持学报,2003,17(4):51-54.

[6] 鲁如坤. 土壤农业化学分析法[M]. 北京:农业出版社,1999.

[7] 关松荫,张德生,张志明. 土壤酶及其研究法[M]. 北京:农业出版社,1986.

[8] 吕晓男,陆允甫,王人潮. 土壤肥力综合评价初步研究[J]. 浙江大学学报,1999,25(4):378-382.

[9] 王军艳,张凤荣,王茹,等. 应用指数和法对潮土农田土壤肥力变化的评价研究[J]. 农村生态环境,2001,17(3):13-16.

[10] 孙波,赵其国,张桃林. 我国东南丘陵山区土壤肥力的综合评价[J]. 土壤学报,1995,32(4):362-369.

[11] 刘梦云,安韶山,常庆瑞,等. 宁南山区不同土地利用方式土壤质量评价[J]. 水土保持研究,2005,3:37-39.

[12] 林大仪. 土壤学[M]. 北京:中国林业出版社,2002.

[13] Malagoli M, Canal A D, Quaggiotti S, et al. Differences in nitrate and ammonium uptake between Scots pine and European larch[J]. Plant and Soil, 2000, 221:1-3.

[14] Berg B. Litter decomposition and organic matter turnover in northern forest soils[J]. Forest Ecology and Management, 2000,133:13-22.

[15] 宋会兴,苏智先,彭远英. 山地土壤肥力与植物群落次生演替关系研究[J]. 生态学杂志,2005,24(12):1531-1533.

点,以此外推估计不如研究区内。

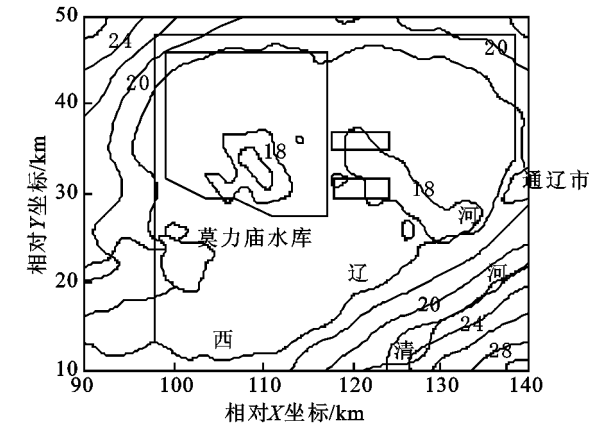


图 5  $d_{50}$  等值线图

8 结 论

研究应用有限的岩性试验数据,对定性测定出的岩性信息进行了定量化处理,应用协同克里格法研究了非饱和带岩性的空间变异性,准确地揭示非饱和带岩性变化规律,为非饱和带四水转化关系机理研究提供了坚实的岩性变异依据。这一研究方法对非饱和带岩性垂向上较为均匀,而水平方向变异显著的平原区尤为适用,变量的估值精度较高,又能节省大量的人力物力,具有广泛的推广应用前景。

参考文献:

[1] Aboufirassi M, Martin M A. Cokriging of aquifer trasmissivities from field measurement of transsimivity and specific capacity[J]. Mathematical Geology, 1984, 16(1):19-35.

[16] 张德强,叶万辉,余清发,等.鼎湖山演替系列中代表性森林凋落物研究[J].生态学报,2000,20(6):938-944.

[17] 周礼恺.土壤酶学[M].北京:科学出版社,1987.

[18] Fioretto A, Papa S, Curcio E, et al. Enzyme dynamics on decomposing leaf litter of Cistus incanus and Myrtus communis in a Mediterranean ecosystem[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2000, 32: 1847-1855.

[19] 骆宗诗,向成华,慕长龙.绵阳官司河流域主要森林类型凋落物含量及动态变化[J].生态学报,2007,27(5):1772-1781.

[20] 阎德仁,王晶莹,杨茂仁.落叶松人工林土壤衰退趋势[J].生态学杂志,1997,16(2):62-66.

[21] 陈立新,肖洋.大兴安岭林区落叶松林地不同发育阶段土壤肥力演变与评价[J].中国水土保持科学,2006,4(5):50-55.

[22] Sumners W H, Archibold O E. Exotic plant species in

[2] Shakeel Ahmed, Ghislain de Marsily. Comparison of geostatistical methods for estimation transmissivity using data on transmissivity and specific capacity[J]. Water Resources Research, 1987, 23(9):1717-1737.

[3] Shakeel Ahmed, Ghislain de Marsily, Alain Talbot. Combined use of hydraulic and electrical properties of an aquifer in a geostatistical estimation of tranmissivity[J]. Ground water, 1988, 26(1):78-86.

[4] Clifton Peter M, Neuman Shlomo P. Effects of Kriging and inverse modeling on conditional simulation of the Avra Vally aquifer in southern Arizona[J]. Water Resources Research, 1982, 18(4):1215-1234.

[5] Neuman Shlomo P. A statistical approach to the inverse problem of aquifer hydrology[J]. Geology Society of AM special paper, 1982, 18(4):81-102.

[6] Chaolunbagen, Liu Tingxi. The Study of Spatial Variability on Aquifer hydraulic Conductivity. K[J]. Acta Geologica Sinica, 1995, 8(2):197-207.

[7] 朝伦巴根,和泰,刘廷玺,等.含水层渗透参数  $K$  空间变异性研究[J].地质学报,1994,68(4):358-367.

[8] 刘廷玺,朝伦巴根.多时段泛克立格空间估计理论及其在水文领域中的应用[J].水利学报,1995,(2):76-83.

[9] 王亮,朝伦巴根.基于非列线数据的泛克立格法在地下水位空间变异性研究中的应用[J].水资源与水工程学报,2007,18(4):27-31.

[10] 王亮,朝伦巴根,金菊良,等.基于孔穴效应的时空变差函数在水文数据插补延长中的应用[J].水文,2008,28(6):15-20.

[11] 张仁铎.空间变异理论及应用[M].北京:科学出版社,2005.

(上接第 93 页)

the southern boreal forest of Saskatchewan [J]. Forest Ecology and Management, 2007, 251:156-163.

[23] 陈立新,陈祥伟,段文标.落叶松人工林凋落物与土壤肥力变化的研究[J].应用生态学报,1998,9(6):581-586.

[24] Zheng Y S, Ding Y X. Effect of mixed forests of Chinese-fir and Tsoong's tree on soil properties[J]. Pedosphere, 1998, 8(2):161-168.

[25] 黄宇,汪思龙,冯宗炜,等.不同人工林生态系统林地土壤质量评价[J].应用生态学报,2004,15(12):2199-2205.

[26] 蒋文伟,俞益武,姜培坤,等.湖州主要森林类型土壤肥力的灰色关联度分析与评价[J].生态学杂志,2002,21(4):18-21.

[27] 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,2002,15(6):700-705.