

人为干扰对黄土高原子午岭油松人工林 土壤物理性质的影响

张希彪^{1,2}, 上官周平^{2,*}

(1. 陇东学院生命科学系, 甘肃庆阳 745000; 2. 西北农林科技大学黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西杨陵 712100)

摘要:研究了放牧、收集枯落物及清灌等人为干扰活动对黄土高原子午岭油松林土壤结构及抗蚀性的影响。结果表明,随人为干扰强度的增加,0~50cm 土壤中砂粒含量比无干扰时分别增加了 11.83%、37.80%和 51.60%;粉粒下降了 8.16%、11.83%和 15.55%;粘粒下降了 8.10%、20.84%和 30.72%,土壤表现出粗骨化趋势;>0.25mm 水稳性团聚体含量比无干扰林地分别下降了 16.59%、43.12%和 61.13%,>1.0mm 的团聚体含量仅为无干扰林地土壤的 27.78%和 24.34%,1.0~0.25mm 的团聚体下降幅度较小;>0.05mm 微团聚体的比例分别下降了 19.39%、32.62%和 33.47%。而<0.05mm 微团聚体所占比例随干扰程度的增加而大幅度上升。土壤容重增加了 0.11~0.41g/cm³。土壤总孔隙度分别降低了 13.64%、25.47%和 39.14%,毛管孔隙下降了 7.79%、11.54%和 29.32%,非毛管孔隙下降了 28.47%、60.79%和 64.08%。说明表层土壤非毛管孔隙对人为干扰更为敏感。最大持水量分别下降 23.42%、37.15%和 52.92%;毛管持水量下降 33.79%、43.01%和 52.22%;自然含水量下降 31.03%、39.34%和 46.28%,饱和持水量下降 16.14%、28.80%和 49.68%;田间持水量下降了 12.39%、33.92%和 47.47%;土壤有效水含量下降了 9.55%、20.55%和 58.91%。土壤前 3min 初渗率下降了 38.74%、51.45%和 63.23%;稳渗速率下降了 54.06%、71.63%和 84.10%,相应地受人为干扰林地前 30min 累计入渗量也较未受人为干扰林地土壤分别低 48.15%、65.93%和 73.35%。饱和导水率较对照下降了 8.73%、33.33%和 51.00%。土壤的结构系数,由 79.12%下降到 27.32%,团聚度由 59.48%下降到 11.11%,分散率上升了 1 倍多,分散系数上升了 4 倍多。土壤枯落物层及有机质的减少是引起土壤物理性质恶化的主要原因,其次是放牧和踏实等活动。

关键词:黄土高原;油松人工林;森林土壤;物理性质;人为干扰;土壤退化

文章编号:1000-0933(2006)11-3685-11 中图分类号:S718.5 文献标识码:A

Effect of Human-induced disturbance on physical properties of soil in artificial *Pinus tabulaeformis* Carr. forests of the Loess Plateau

ZHANG Xi-Biao^{1,2}, SHANGGUAN Zhou-Ping^{2,*} (1. Longdong University, QingYang Gansu 745000, China; 2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China). Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(11): 3685~3695.

Abstract: The effects of grazing, litter collection and shrub clearance on soil structure and antierodibility were investigated in artificial *Pinus tabulaeformis* Carr. forests of the Loess Plateau. Results showed that compared with those in undisturbed soil, the sand grain contents in 0~50 cm soil with the human disturbances of increasing intensities increased separately by 11.83%,

基金项目:国家重点基础研究发展规划资助项目(2002CB111502);中国科学院西部行动计划资助项目;教育部新世纪优秀人才培养计划资助项目(NCET-04-0955);西北农林科技大学拔尖人才与创新团队资助项目

收稿日期:2005-08-20;**修订日期:**2005-12-20

作者简介:张希彪(1963~),男,甘肃省武威市人,硕士,副教授,主要从事植被生态学和景观生态学教学研究。E-mail: xibiao Zhang@sina.com

*通讯作者 Corresponding author. E-mail: shangguan@ms.iswc.ac.cn

Foundation item: The project was financially supported by National State Key Basic Research Special Foundation Project (No. 2002CB111502), the CAS Knowledge Innovation Project, the Program for New Century Excellent Talents in University (No. NCET-04-0955) and the Program of Talent Training Program in Northwest A & F University

Received date: 2005-08-20; **Accepted date:** 2005-12-20

Biography: ZHANG Xi-Biao, Master, Associate professor, mainly engaged in plant ecology and landscape ecology. E-mail: xibiao Zhang@sina.com

37.80 % and 51.60 %, the contents of silt reduced separately by 8.16 %, 11.83 % and 15.55 %, the contents of clay decreased separately by 8.10 %, 20.84 % and 30.72 %, which illustrated that the soil tended to become coarsen; compared with the content of water stable aggregates in undisturbed forestland, the contents of water stable aggregates of >0.25 mm decreased separately by 16.59 %, 43.12 % and 61.13 %, the contents of water stable aggregates of >1.0 mm are separately 27.78 % and 24.34 % that of in undisturbed forest land; the contents of water stable aggregates of $1.0 \sim 0.25$ mm declined to a smaller extent and the proportions of micro-aggregates decreased separately by 19.39 %, 32.62 % and 33.47 %, while the proportions of micro-aggregates of <0.05 mm greatly increased with increasing disturbance intensity. The bulk weights of soil increased by $0.11 \sim 0.41 \text{ g/cm}^3$. The total porosity decreased separately by 13.64 %, 25.47 % and 39.14 % and the capillary spaces decreased separately by 7.79 %, 11.54 % and 29.32 %, and the non-capillary spaces decreased separately by 28.47 %, 60.79 % and 64.08 %. It was shown that the non-capillary space of topsoil is more sensitive to human disturbance. The highest soil water holding capacities decreased separately by 23.42 %, 37.15 % and 52.92 % and the water-holding capacities by soil capillary reduced by 33.79 %, 43.01 % and 52.22 %; the natural water contents dropped down separately by 31.03 %, 39.34 % and 46.28 % and the saturation moisture capacities reduced separately by 16.14 %, 28.80 % and 49.68 %; the field water holding capacities decreased separately by 12.39 %, 33.92 % and 47.47 %, and the content of available soil water reduced separately by 9.55 %, 20.55 % and 58.91 %. The initial infiltration rates in the first three minutes decreased separately by 38.74 %, 51.45 %, and 63.23 % and the stabilized infiltration rates dropped separately by 54.06 %, 71.63 % and 84.10 %, so that the accumulative infiltration in the initial three minutes were 48.15 %, 65.93 % and 73.35 % separately lower than in undisturbed forestlands. The saturated hydraulic conductivities decreased separately by 8.73 %, 33.33 % and 51.00 % compared with that in the control. The structure coefficient of soil declined from 79.12 % to 27.32 %, the aggregations fell from 59.48 % to 11.11 %, the dispersion ratios were more than one times higher and the dispersion coefficients were more than four times higher. Decrease in litter amount and organic matter in soil were the major reason resulting in deterioration in soil physical properties and the grazing and trampling followed.

Key words: Loess Plateau; *Pinus tabulaeformis* Carr; forest soil; physical property; human disturbance; soil degeneration

由于母岩、气候、地形、植被和生物等的不同,导致土壤性质存在明显的差异,使土壤具有空间和时间上的异质性^[1~4]。在不同的空间尺度上,影响土壤特性的因子不同。在较大空间尺度上地质历史、母岩、气候、地形等是影响土壤性质的主要因子^[5];在较小的尺度上,主要受植被分布、微立地以及人为或自然干扰的影响^[6,7]。近年来,国内外对不同生态系统内影响土壤异质性的因子进行了大量研究,对认识不同群落和土地利用方式土壤特性与动态具有重要意义,然而,这些研究并没有充分探讨干扰(尤其是人为干扰)对土壤特性空间异质性的影响。

干扰是自然界中无时无刻不在的一种现象^[8~11],是导致森林生态系统空间异质性的主要因子^[12],直接影响着森林生态系统的演变过程。已有研究表明,由于人类活动如非持续性的农业生产、过度放牧和过度收获薪炭材等,会使森林环境中光、温、水分和养分等环境条件发生变化^[13~16],引起有效资源的空间异质性^[12,14],进而影响林内的生物多样性^[17~20],主要树种的生理生态过程^[21]、植被组成^[22,23]、种群变化^[24,25]、生物量生产^[26]和系统的演替进程等^[27],从而使已经建立的植被系统的稳定性受到威胁^[28,29]。人类活动而引起森林数量和质量下降的程度,取决于人类影响森林的方式、程度、持续的时间和森林的抗干扰能力^[15,30~34]。长期持续、高频度的干扰对植被的退化具有累加和放大的作用,并导致生态系统严重退化^[28,35],稳定性降低^[33,34]。因此,对土壤结构进行量化描述以及土壤结构动态演化过程等方面进行研究,是评价人类活动的介入与生态环境变化之间关系的重要内容^[36]。

在水土流失严重,生态环境脆弱的黄土高原地区,受自然因素和不合理人类活动的交互作用,大部分天然林已经破坏殆尽,表土质量下降^[37,38]。以退耕还林还草工程为主的植被生态建设有利于改善区域生态环境,提高生态系统生产力。油松(*Pinus tabulaeformis*, Carr)是本区主要的造林树种,它在调节洪水、涵养水源,保持

水土及改善生态环境等方面都具有重要的作用。但目前油松人工林群落的生产力降低,景观特征呈现退化迹象。同时立地条件恶化,出现了土壤水分的低湿层和利用性干层等使得油松人工林的进一步发育演化受到阻碍。

黄土高原地区的油松人工林多分布在低山丘陵区,村民聚居地周围,人为活动较频繁,长期受到放牧、收集枯落物及清灌、采药等人为活动的影响,这些活动对油松人工林地土壤结构会有什么样的影响?这些变化与干扰强度是否有关?是否会引起土壤退化?目前,对该问题探讨较少。为此,通过对油松人工林进行不同强度的干扰试验,研究土壤结构对人为干扰的响应以及土壤侵蚀的影响,为揭示人工林群落在人类干扰下的退化过程及其机制提供依据,也为合理规避当前日益频繁的人为干扰活动提供依据。

1 研究区域概况和研究方法

1.1 研究区域自然概况

研究区位于黄土高原中部子午岭林区南端的甘肃省正宁县中湾林场,地理坐标为 108°27'E,35°17'N,为黄土丘陵沟壑地貌,海拔 1246~1756m。具有明显的大陆性气候特征,属暖温带冷凉半湿润气候区。该地区多年平均气温 8.3℃,年降水量 623.5mm,其中 7~9 月份降水占到 63%,年蒸发量 1500.8mm,干燥度 0.97,年平均相对湿度 63%~68%,年日照时数 2200~2400h,无霜期 163d。地带性土壤为灰褐色森林土^[39],由残落物层、腐殖质层、粘化(心化)层、钙积层和母质层组成。残落物层一般 2~4cm,腐殖质层厚度约 10~15cm,呈暗褐色粒状结构,土壤疏松多孔,有机质含量为 2.57%~4.28%。土壤全剖面石灰反应强烈,土壤偏碱性,pH 值 6.8~8.5。

油松是子午岭林区主要的造林树种,本区自 20 世纪 60 年代开始种植,现有人工油松林 5.3 万多 hm²,占已保存人工林面积的 81%。子午岭油松林多是纯林,群落结构较天然林简单,林内郁闭度较低,林下物种丰富,常见伴生种有辽东栎(*Quercus liaotungensis*)、漆树(*Toxicodendron vernicifluum*)、山杨(*Populus davidiana*)、白桦(*Betula platyphylla*)、刺五加(*Acanthopanax senticosus*)、杜梨(*Pyrus betulaefolia*)等。灌木层有虎榛子(*Ostryopsis davidiana*)、胡枝子(*Lespedeza* sp.)、黄刺玫(*Rose xanthina*)、樱草蔷薇(*Rosa primula*)、水棘子(*Cotoneaster multiflorus*)、土庄绣线菊(*Spiraea pubescens*)、毛樱桃(*Prunus tomentosa*)、茶条槭(*Acer ginnala*)、陕西荚蒾(*Viburnum schensianum*)、北京丁香(*Syringa pekinensis*)、几种忍冬(*Lonicera* sp.)、卫矛(*Euonymus alatus*)等;草本层主要有披针苔草(*Carex lanceolata*)、唐松草(*Thalictrum* sp.)、糙苏(*Phlomis umbrosa*)、茜草(*Rubia cordifolia*)、淫羊藿(*Epimedium brevicorum*)、卷叶黄精(*Polygonatum cirrhifolium*)、大火草(*Anemone tomentosa*)、异叶败酱(*Patrinia heterophylla*)、杠柳(*Periploca sepium*)、乌头叶蛇葡萄(*Ampelopsis aconitifolia*)等^[40]。

1.2 研究内容和方法

1.2.1 样地的选择 为了把造成土壤本身性质空间异质性的因子最小化,样地选择在相同母质形成的黑垆土上,土壤形成的生物气候条件和立地条件大致相似。林分为 20 世纪 60 年代天然次生林皆伐后人工栽植的油松林,林龄基本相同,样地海拔高度为 1620~1640m,样地面积分为 1200m²,自 1992 年起对样地采用不同的管理措施。

表1 样地基本概况

Table 1 Basic conditions of sample land under different intensities of human-induced disturbance							
干扰程度 Disturbance degree	林龄 Forest age (a)	海拔 Altitude (m)	坡向 Aspect	坡度 Slope (°)	乔木层高度 Tree height (m)	郁闭度 Coverage	植物种数 Species number
无干扰 None	42~45	1650	SW53°20'	38	11.1	0.85	15
轻度干扰 Slight	43~46	1620	SW50°30'	35	10.2	0.75	13
中度干扰 Moderate	43~47	1640	SW58°30'	33	9.5	0.60	10
重度干扰 Heavy	42~46	1660	SW68°	35	8.2	0.50	7

干扰强度的划分:分为轻度、中度、重度和无人干扰 4 级^[22,26,27]。重度干扰:全年放牧、每年砍伐林下灌

木、收集枯落物 3~4 次,郁闭度 0.5;中度干扰:放牧时间在 11 月至翌年 3 月份,其余时间禁牧,每年砍伐林下灌木、收集枯落物 2~3 次,郁闭度 0.6;轻度干扰:每年收集枯落物 1~2 次,无清灌、放牧等其它活动,郁闭度 0.7;无人干扰(CK):完全封育,周围用铁丝网围起,几乎无人活动,郁闭度 0.85。

1.2.2 土壤物理性质分析 为了减少其它环境因子的影响,选择在雨后至少 4~5d 的晴天进行采样^[14]。土壤取样时间分别为 2003 年 6 月 20 日、9 月 16 日;2004 年 5 月 25 日、9 月 23 日。对标准样地内植物生长状况(高度、盖度、密度、郁闭度等)进行调查,在每个标准样地内按 S 形布设样点 10~12 个,分层(0~20cm、20~50cm)取环刀样和土壤样品。文中数据为 4 次多点分析数据的平均值。

土壤粒级分析用吸管法;土壤容重、持水量、孔隙度等水分物理性质用环刀一次取样连续测定^[41];土壤有机质测定用重铬酸钾外加热氧化法;土样经室内风干后,用湿筛法和移液管法测定水稳性团聚体和微团聚体含量;土壤总孔度和毛管孔度用浸水法^[42];土壤渗透速率的测定采用野外双环法^[41]。

1.2.3 抗蚀性指标计算 参考胡建忠等^[43,44]的方法分析土壤抗蚀性指标。团聚状况 = ($> 0.05\text{mm}$ 微团聚体分析值) - ($> 0.05\text{mm}$ 机械组成分析值);团聚度 = 团聚状况 / ($> 0.05\text{mm}$ 微团聚体分析值);分散率 = ($< 0.05\text{mm}$ 微团聚体分析值) / ($< 0.05\text{mm}$ 机械组成分析值);分散系数 = ($< 0.001\text{mm}$ 微团聚体分析值) / ($< 0.001\text{mm}$ 机械组成分析值)。

2 结果与分析

2.1 不同人为干扰强度对土壤颗粒组成的影响

在人为干扰下,林地土壤的机械组成发生了显著变化(表 2),同一剖面在无干扰和轻度干扰时,表层土壤(0~20cm)砂粒($1\sim 0.05\text{mm}$)含量低于下层(20~50cm),粉粒($0.05\sim 0.001\text{mm}$)、粘粒($< 0.001\text{mm}$)和物理性粘粒含量较下层高,但在中度和重度干扰下,表层土壤的砂粒含量高于下层,粉粒、粘粒和物理性粘粒含量低于下层,说明人为干扰首先引起地表土壤结构的变化。不同干扰之间随干扰程度的增加,土壤中砂粒($> 0.05\text{mm}$)比无干扰时分别增加了 11.83%、37.80%和 51.60%;粉粒($0.05\sim 0.001\text{mm}$)比无干扰时分别下降了 8.16%、11.83%和 15.55%;粘粒($< 0.001\text{mm}$)比无干扰时分别下降了 8.10%、20.84%和 30.72%。在粉粒中变化比较大的是 $0.005\sim 0.001\text{mm}$ 颗粒的含量。物理性粘粒比无干扰时分别下降了 7.90%、20.80%和 26.17%,表明在人为干扰下,土壤粘粒优先迁移,土壤向粗骨化方向发展。

表 2 不同人为干扰强度下土壤颗粒组成

Table 2 Soil mechanical composition under different intensities of human-induced disturbance

干扰程度 Disturbance degree	剖面层次 Soil profiles (cm)	粒径分布 Soil particle size(mm) distribution					
		砂粒 Sand	粉粒 Silt		粘粒 Clay	物理性粘粒 Physical clay	
		1~0.05	0.05~0.01	0.01~0.005	0.005~0.001	< 0.001	< 0.01
无干扰 None	0~20	25.87 $\pm$ 1.26	24.61 $\pm$ 2.12	16.08 $\pm$ 1.24	22.21 $\pm$ 1.71	11.23 $\pm$ 1.23	49.52 $\pm$ 4.18
	20~50	29.81 $\pm$ 1.17	27.36 $\pm$ 1.31	16.35 $\pm$ 2.18	17.36 $\pm$ 1.42	9.12 $\pm$ 0.14	42.83 $\pm$ 3.74
轻度干扰 Slight	0~20	28.93 $\pm$ 1.02	25.46 $\pm$ 2.25	15.12 $\pm$ 1.31	20.17 $\pm$ 1.27	10.32 $\pm$ 0.36	45.61 $\pm$ 2.94
	20~50	31.39 $\pm$ 1.14	26.27 $\pm$ 3.98	14.21 $\pm$ 1.12	19.21 $\pm$ 1.35	8.92 $\pm$ 0.28	39.95 $\pm$ 2.75
中度干扰 Moderate	0~20	35.65 $\pm$ 1.43	25.13 $\pm$ 1.12	18.51 $\pm$ 1.13	11.82 $\pm$ 1.62	8.89 $\pm$ 0.56	39.22 $\pm$ 3.31
	20~50	34.27 $\pm$ 1.10	25.47 $\pm$ 1.33	18.89 $\pm$ 1.08	13.15 $\pm$ 1.34	8.22 $\pm$ 0.32	40.26 $\pm$ 2.74
重度干扰 Heavy	0~20	39.12 $\pm$ 1.25	24.34 $\pm$ 2.34	17.42 $\pm$ 1.24	11.36 $\pm$ 1.14	7.78 $\pm$ 0.09	36.56 $\pm$ 2.47
	20~50	37.25 $\pm$ 1.42	25.62 $\pm$ 1.19	16.94 $\pm$ 1.31	12.18 $\pm$ 1.13	8.02 $\pm$ 0.10	37.14 $\pm$ 2.54

2.2 不同人为干扰强度对土壤团聚体的影响

土壤团聚体是土壤的重要组成部分,保证和协调土壤中的水肥气热、影响土壤酶的种类和活性、维持和稳定土壤疏松熟化层并直接影响植物的生产力^[45,46]。

随人为干扰强度的增加,土壤中各级水稳性团聚体含量呈下降趋势(表 3)。轻度、中度和重度干扰下土壤中, $> 0.25\text{mm}$ 水稳性团聚体含量比无干扰林地分别下降了 16.59%、43.12%和 61.13%,其中以 $> 2.0\text{mm}$ 和 $1.0\sim 2.0\text{mm}$ 的水稳性团聚体含量下降幅度最大。在重度干扰下, $> 2.0\text{mm}$ 和 $1.0\sim 2.0\text{mm}$ 的团聚体含量仅为

无干扰林地土壤的 27.78 %和 24.34 % ,1.0~0.5mm 和 0.5~0.25mm 的团聚体下降幅度较小。说明随干扰强度的增大,土壤的团聚度下降,且大团聚体的敏感性更高,这种变化与土壤有机质的变化趋势是一致的。

土壤肥力水平的高低,不仅取决于大、小粒级微团聚体自身的作用,而且与它们的组成比例也有关^[36]。由表 4 可见,受人为干扰程度的不同,土壤微团聚体的数量比例存在差别。随人为干扰程度的增加,粒径 > 0.05mm 微团聚体的比例分别下降了 19.39 %、32.62 %和 33.47 %。而粒径 < 0.05mm 微团聚体所占比例随干扰程度的增加而大幅度上升,其中 < 0.01mm 微团聚体所占比例较无干扰时增加了 1~3 倍。土壤团聚体主要由胶体凝聚、胶结而相互联结的土壤颗粒组成,土壤中的大团聚体,特别是 > 1mm 大团聚体,是植物良好生长的结构基础。随人为干扰强度的增加,大团聚体崩解破坏后转移到微团聚体部分,引起微团聚体数量上升,土壤结构性变差。

表 3 不同人为干扰强度下土壤水稳性团聚体的变化

Table 3 Soil water-stable aggregate content under different intensities of human-induced disturbance								
干扰程度	剖面层次	各级 (mm) 水稳性团聚体含量 (%)						土壤有机质
Disturbance degree	Soil profiles (cm)	Water-stable aggregate contents for different particulate sizes						SOM (g/kg)
		> 5.0	5.0~2.0	2.0~1.0	1.0~0.5	0.5~0.25	> 0.25	
无干扰 None	0~20	14.82 ±1.24	16.12 ±1.32	18.32 ±1.46	14.45 ±1.89	10.75 ±1.31	74.46 ±7.22	16.36 ±1.89
	20~50	10.26 ±1.11	15.62 ±1.24	8.26 ±1.95	9.88 ±1.25	10.19 ±2.01	54.21 ±7.56	12.28 ±1.54
轻度干扰 Slight	0~20	9.94 ±0.97	13.34 ±1.22	16.01 ±2.14	12.40 ±2.01	10.86 ±1.33	62.12 ±7.67	15.52 ±1.62
	20~50	6.64 ±1.06	7.74 ±0.98	8.20 ±1.21	8.39 ±0.68	9.39 ±0.64	40.36 ±5.47	11.71 ±1.02
中度干扰 Moderate	0~20	5.24 ±0.98	9.85 ±0.79	8.41 ±0.83	7.62 ±0.92	10.23 ±0.64	42.35 ±4.16	10.34 ±1.34
	20~50	5.46 ±1.45	4.36 ±0.87	6.21 ±1.14	7.51 ±0.81	6.24 ±0.57	29.78 ±4.84	7.63 ±1.12
重度干扰 Heavy	0~20	3.99 ±0.62	3.68 ±0.64	4.46 ±0.77	8.09 ±0.81	8.57 ±0.76	28.79 ±3.60	6.94 ±1.03
	20~50	0.91 ±0.07	3.01 ±0.37	3.98 ±0.62	8.16 ±0.83	9.54 ±0.91	25.61 ±2.81	5.34 ±0.81

表 4 不同人为干扰强度下土壤微团聚体组成

Table 4 Soil micro-aggregate composition under different intensities of human-induced disturbance							
干扰程度 Disturbance degree	剖面层次 Soil profiles (cm)	微团聚体 (mm) 组成 (%)					
		Soil micro-aggregate particulate (mm) composition (%)					
		0.25~0.05	0.05~0.01	0.01~0.005	0.005~0.001	< 0.001	< 0.01
无干扰 None	0~20	66.32 ±3.38	24.58 ±2.23	4.57 ±0.67	2.76 ±0.33	2.54 ±0.43	9.87 ±1.43
	20~50	51.24 ±2.64	32.41 ±2.11	8.12 ±0.74	6.32 ±0.87	1.94 ±0.01	16.39 ±1.62
轻度干扰 Slight	0~20	53.46 ±2.17	31.91 ±2.37	5.81 ±0.55	5.97 ±0.52	2.85 ±0.31	14.63 ±1.38
	20~50	52.72 ±3.88	30.56 ±2.01	8.23 ±1.68	5.21 ±0.31	3.34 ±0.12	16.78 ±2.11
中度干扰 Moderate	0~20	44.68 ±2.31	31.34 ±1.89	9.31 ±0.83	11.28 ±0.64	3.49 ±0.24	24.08 ±1.71
	20~50	41.23 ±2.34	32.13 ±2.67	8.96 ±0.42	12.14 ±1.83	5.14 ±0.16	26.24 ±2.41
重度干扰 Heavy	0~20	44.12 ±2.46	28.36 ±1.36	8.67 ±1.61	12.17 ±0.71	6.78 ±0.33	27.62 ±2.65
	20~50	40.89 ±3.02	31.47 ±2.18	7.62 ±0.37	11.52 ±1.44	8.52 ±1.51	27.66 ±3.32

2.3 不同人为干扰强度对土壤容重和孔隙度的影响

土壤容重是土壤紧实度的敏感性指标,也是表征土壤质量的一个重要参数^[46,47],它与土壤的孔隙度和渗透率密切相关。在无人为干扰时,表层土壤容重远低于下层,但随干扰强度的增加,上下层之间土壤容重趋于接近(表 5)。在人为干扰下,土壤容重分别增加了 0.11~0.41g/cm³。随干扰强度的增加,土壤容重增加,土壤变紧实。由于高的容重值通常表明土壤有退化的趋势^[48,49],所以,表明干扰强度越大,土壤退化越严重。

土壤孔隙度的大小、数量及分配是土壤物理性质的基础,也是评价土壤结构特征的重要指标。林地土壤总孔隙、毛管孔隙和非毛管孔隙的比例,随人为干扰程度的增加大幅下降(表 5)。轻度、中度、重度人为干扰较无干扰的表层土壤总孔隙度分别降低了 13.64 %、25.47 %和 39.14 %,毛管孔隙分别下降了 7.79 %、11.54 %和 29.32 %,非毛管孔隙分别下降了 28.47 %、60.79 %和 64.08 %,说明表层土壤非毛管孔隙对人为干扰更为敏感。随干扰加剧,毛管孔隙和通气孔隙递减,而非活性孔隙递增,表明土壤结构变差。

2.4 不同人为干扰强度对土壤持水性能的影响

土壤持水性能直接影响土壤抗水蚀能力,是反映土壤生态功能的重要指标^[44]。由表 6 可见,随干扰程度的增加,土壤持水量和土壤有效水含量明显下降,其中最大持水量分别下降 23.42 %、37.15 %和 52.92 %;毛管持水量分别下降 33.79 %、43.01 %和 52.22 %;自然含水量下降 31.03 %、39.34 %和 46.28 %,饱和持水量分别下降 16.14 %、28.80 %和 49.68 %;田间持水量下降了 12.39 %、33.92 %和 47.47 %;土壤有效水含量分别较无人为干扰林地土壤下降了 9.55 %、20.55 %和 58.91 %。从分析可知,人为干扰中土壤持水性变化与土壤孔隙度变化趋势具有一定的相似性,但土壤持水量递减率更加明显;土壤含水量的差异与坡度、植被覆盖物、凋落物层的厚度以及土壤颗粒组成等密切相关;人为活动不但破坏了土壤结构,而且影响土壤水分的贮存性能,进而影响到植物的生长。

表 5 不同人为干扰强度下土壤孔隙分布

Table 5 Distribution of soil porosity under different intensities of human-induced disturbance

干扰程度 Disturbance degree	剖面层次 Soil profiles (cm)	容重 Bulk density (g/cm ³)	总孔隙度 Total porosity (%)	毛管孔隙度 Capillary porosity (%)	非毛管孔隙度 Non-capillary porosity (%)
无干扰 None	0~20	1.02 ±0.13	61.51 ±5.27	51.23 ±3.36	11.28 ±1.91
	20~50	1.21 ±0.11	54.34 ±4.74	36.51 ±2.88	17.47 ±1.86
轻度干扰 Slight	0~20	1.12 ±0.20	57.74 ±4.72	47.24 ±2.76	12.18 ±1.96
	20~50	1.32 ±0.21	50.19 ±3.33	34.31 ±2.31	14.59 ±1.02
中度干扰 Moderate	0~20	1.31 ±0.16	50.57 ±3.41	45.32 ±1.99	8.02 ±1.42
	20~50	1.42 ±0.31	46.42 ±4.59	41.40 ±3.21	5.28 ±1.38
重度干扰 Heavy	0~20	1.51 ±0.29	43.78 ±4.65	36.21 ±2.64	7.74 ±2.01
	20~50	1.53 ±0.64	42.26 ±3.14	37.58 ±2.12	4.21 ±1.02

表 6 不同人为干扰强度下土壤水分状况

Table 6 Soil moisture status under different intensities of human-induced disturbance(%)

干扰程度 Disturbance degree	剖面层次 Soil profiles (cm)	最大持水量 Maximal water-holding capacity	毛管持水量 Capillary water-holding capacity	饱和持水量 Saturated water capacity	田间持水量 Field moisture capacity	自然含水量 Natural water content	凋萎含水量 Wilting water content	有效含水量 Available water content
无干扰 None	0~20	87.52 ±3.56	40.51 ±2.16	53.95 ±1.67	33.81 ±2.13	26.84 ±1.24	14.25 ±1.32	19.56 ±1.34
	20~50	76.26 ±3.12	37.24 ±2.34	46.59 ±2.02	30.62 ±2.34	24.33 ±1.45	13.45 ±1.22	17.17 ±1.25
轻度干扰 Slight	0~20	68.57 ±2.96	37.94 ±3.67	45.24 ±1.63	29.62 ±1.27	24.16 ±1.63	13.12 ±1.86	16.50 ±1.36
	20~50	56.23 ±2.31	36.51 ±1.94	42.72 ±2.12	25.58 ±1.64	23.42 ±1.22	11.52 ±0.87	14.06 ±1.71
中度干扰 Moderate	0~20	56.28 ±2.87	26.44 ±1.72	38.41 ±1.43	22.34 ±1.12	16.54 ±1.88	9.21 ±0.76	13.13 ±1.64
	20~50	44.41 ±2.61	25.36 ±1.64	33.54 ±1.24	20.19 ±1.03	15.82 ±1.69	7.95 ±1.22	12.24 ±1.22
重度干扰 Heavy	0~20	42.16 ±1.94	20.94 ±1.55	27.15 ±1.37	17.76 ±1.67	14.76 ±1.63	8.64 ±1.04	9.12 ±1.68
	20~50	41.52 ±2.01	18.26 ±1.21	25.68 ±1.62	15.49 ±1.02	12.63 ±1.47	6.62 ±0.34	8.87 ±0.98

2.5 不同人为干扰强度对土壤渗透性和抗蚀性能的影响

土壤渗透性是表征土壤对降水的就地入渗和吸收能力。土壤水分入渗性能影响到降雨产流量及对土壤水分的补给,是评价林地水分调节能力的主要标志之一^[43~45]。从表 7 可见,不同程度人为干扰下,土壤表层(0~20cm)渗透速率较无人为干扰林地土壤渗透速率小,轻度、中度和重度人为干扰比未受人为干扰的土壤前 3min 初渗率分别下降了 38.74 %、51.45 %和 63.23 %;稳渗速率分别下降了 54.06 %、71.63 %和 84.10 %,相应地受人为干扰林地前 30min 累计入渗量也较未受人为干扰林地土壤分别低 48.15 %、65.93 %和 73.35 %。饱和导水率较对照分别下降了 8.73 %、33.33 %和 51.00 %。人为干扰过程中过度放牧压实土壤和土壤地表凋落物被收走造成土壤一定深度内孔隙度的下降,尤其大孔隙的丧失是土壤渗透速率下降的主要原因。无干扰林地土壤表层由于根系及枯落物的作用,其稳渗速率达到了 14.91mm/min,而重度干扰地表的稳渗速率仅为 2.37mm/min,同等条件下重度干扰林地的径流量较前者约增加 5~10 倍。

随干扰程度的增加,土壤的结构系数下降,由 79.12 %下降到 27.32 %,团聚度由 59.48 %下降到 11.11 %,分散率由 45.96 %上升到 95.76 %,上升了 1 倍多,分散系数上升了 4 倍多。随人为干扰强度的增加,土壤抗侵

蚀能力大大降低。

4 讨论

土壤质量不仅是自然属性,更是人为因素作用的结果^[50]。有研究表明,人为干扰活动每年从森林中直接取走大量的养分,显著减轻了土壤轻腐殖质(Soil light organic matter)量,直接导致林地土壤肥力衰退和生产力降低^[51]。也有研究认为,凋落物和林下层收割这种仅取走森林部分生物量的人为活动对森林的影响不至于造成毁灭性破坏或影响甚微^[46~48]。本研究表明,人为干扰活动不仅改变了林分内地面的覆盖物和林下灌木层,而且通过放牧、人为踩踏等对土壤造成压实,直接或间接影响了土壤的颗粒组成,团聚体数量及大小和土壤孔隙的大小及分布、土壤持水性能,并导致土壤入渗能力降低,土壤的抗冲蚀能力下降,最终导致林地土壤发生退化。

表 7 不同人为干扰强度下土壤渗透性能和抗蚀性能

Table 7 Soil infiltration capacities and soil anti-erodibility under different intensities of human-induced disturbance								
干扰程度 Disturbance degree	初渗率 Initial infiltration rate (mm/min)	稳渗率 Stable infiltration rate (mm/min)	饱和导水率 Saturated infiltration rate (mm/min)	前 30min 入渗率 Infiltration rate forward 30 min (mm/min)	结构系数 Structure coefficient (%)	分散系数 Dispersion Coefficient (%)	分散率 Dispersion rate (%)	团聚度 Aggregate degree (%)
无干扰 None	36.51	14.91	1.26	18.61	79.12	20.88	45.96	59.48
轻度干扰 Slight	28.24	6.85	1.15	9.65	72.64	27.36	66.42	44.01
中度干扰 Moderate	16.87	4.23	0.84	6.34	45.81	54.19	85.30	21.33
重度干扰 Heavy	10.67	2.37	0.75	4.96	35.62	64.38	91.94	11.11

土壤颗粒是构成土壤结构的主要组分,土壤微团聚体组成是土壤结构性的一个重要方面,它是形成各种团聚体,特别是团粒结构(0.25~10mm)的基础。人为活动一方面改变了地面的覆盖物,当发生降雨时,雨滴直接击溅地面,细小土粒堵塞孔隙,使土壤的渗透速率降低,地表径流增加,在水动力的作用下土壤中细土随水流走,故表现出随人为干扰强度的增加,土壤中细粒减少,土壤质地变粗^[36~38]。同时,由于地面凋落物减少,土壤中有有机质来源减少,导致土壤颗粒缺乏有机质的胶结,引起土壤大团聚体破坏,产生更小的可移动的颗粒,不仅易在土壤表面形成结皮,而且导致土壤团聚体构成比例失调及团聚体稳定性下降,从而进一步恶化土壤水热传输过程和养分保持供应过程,加剧了各样地土壤颗粒组成的异质性。土壤颗粒组成的变化直接影响到土壤持水量、凋萎湿度、容重和孔隙度。由于细颗粒特别是粘粒本身包含较多的养分,因此,随干扰强度的增加,土壤中细颗粒的流失是导致其土壤质地砂化和肥力退化的原因之一。

土壤微团聚体和水稳性团聚体的状况是影响土壤肥力的一个重要因素,其数量、大小和稳定性决定着土壤孔隙的大小和结构的稳定性,是影响土壤通透性、抗蚀性及土壤肥力的重要指标^[36,47,52]。随着人为干扰强度的增加,子午岭森林土壤中>0.25mm团粒含量显著减少,其中以>2和1~2mm的土壤团粒减少最显著,且它们的减少与干扰程度成正相关。大团聚体比微团聚体含有更多的碳和氮,更富生物体物质和特殊有机质^[36]。彭新华等^[53]研究表明,随着有机质含量的增加,土壤团聚体的稳定性显著增加,粘粒的分散性显著降低。

土壤容重是土壤紧实度的指标之一,其大小主要受到土壤颗粒组成、土壤有机质含量、放牧践踏程度的影响^[48]。贾树海等^[54,55]认为土壤的容重对草地的退化具有敏感性,可以作为草地退化的数量指标,且放牧处理对容重的影响仅限于0~10cm。一般认为,随着放牧等人为干扰强度的增加,牲畜对土壤的压实作用愈来愈强烈,土壤的容重逐渐增加。本研究表明,中度和重度干扰(包括放牧等)阶段土壤容重比未干扰阶段分别增加了22.42%和36.32%,且0~20cm和20~50cm深度内容重均有不同程度的增加,说明放牧和收集林下枯落物等对土壤容重的增加具有累加效应。这一结论与Greenwood等^[56]的研究结果一致。

为了更深入理解土壤物理性状之间的相互影响,对主要指标进行了相关分析(表8)。从表8可见,土壤

容重与有机质含量呈极显著的负相关 ($r = -0.821^{**}$), 说明土壤容重的差异一部分由于有机质差异所致。土壤容重与土壤孔隙性和土壤持水特性呈极显著的负相关, 说明土壤总孔隙、毛管孔隙、非毛管孔隙和土壤持水性能直接决定于土壤容重, 间接受土壤有机质的影响^[54,55]。

表 8 土壤物理性质的相关系数 ($N = 42$)

指标 Index	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9
有机质 OM (X_1)	- 0.821 **	0.744 **	0.653 **	0.473 *	0.849 **	0.778 **	0.476 *	0.761 **
容重 Bulk density (X_2)	1	- 0.923 **	- 0.714 **	- 0.687 **	- 0.816 **	- 0.723 **	- 0.607 **	- 0.580 *
总孔隙 Total porosity (X_3)		1	0.764 **	0.701 **	0.843 **	0.742 **	0.616 **	0.540 *
毛管孔隙 Capillary porosity (X_4)			1	- 0.688 **	0.788 **	0.696 **	- 0.386 *	0.490 *
非毛管孔隙 Non-capillary porosity (X_5)				1	0.438 *	0.319	0.578 **	0.354 *
饱和持水量 Maximum moisture capacity (X_6)					1	0.936 **	0.648 **	0.644 **
毛管持水量 Capillary moisture capacity (X_7)						1	0.652 **	0.776 **
非毛管含水量 Non-capillary moisture capacity (X_8)							1	0.787 **
自然含水量 Content of natural water (X_9)								1

* $p < 0.05$; ** $p < 0.01$

土壤持水供水能力是土壤团聚体、土壤孔隙状况和土壤颗粒组成的综合反映。人为活动造成土壤饱和和持水量降低, 意味着受人为干扰强度越大, 在相同降雨量下越先产生地表径流, 这既浪费了水资源, 同时加剧了土壤流失, 进而影响了植物的生长发育。

土壤自然含水量与毛管持水量呈极显著正相关 ($r = 0.776^{**}$, $n = 42$), 说明各林地自然含水量的大小主要取决于毛管持水量, 即与毛管孔隙有关。人为干扰强度不同, 造成土壤结构遭破坏的程度不同, 从定量的角度看, 既是土壤孔隙度和孔隙大小分布发生了变化。

土壤自然含水量能较好地反映土壤水分和林内湿润状况, 并影响到凋落物与土壤表层的物质和能量交换及土壤盐基养分的淋溶。当林下土壤和凋落物变得干燥, 会导致凋落物腐烂分解变缓, 向土壤转移的有机质减少, 而有机质减少又使土壤持水能力降低, 这可能是造成土壤湿度减小的重要原因之一。从林地水分实际占有孔隙度分析, 仅为毛管孔隙度的一部分, 毛管孔隙中有相当一部分为空气所填充, 说明子午岭森林群落土壤现有水分贮量远未达到实际贮水能力, 表现出林地土壤干燥现象^[38,44,45]。

透水性和饱和导水率是水分研究的重要参数, 是衡量土壤渗透能力的重要指标。透水性强弱反映土壤水分和养分保蓄能力的大小, 还影响土壤的通气状况和水分利用, 也是土壤肥力状况的指标之一^[58,59]。一般认为, 土壤状况越好, 土壤渗透率越大。本研究发现, 随干扰强度的增加, 土壤水分渗透率呈下降, 开始时渗透率最大, 随时间的推移, 渗透率降低, 其中重度干扰渗透率下降幅度明显增大, 导致土壤蓄水能力下降。土壤饱和导水率与土壤孔隙状况密切相关, 特别是大孔隙分布明显影响导水率。随干扰强度的增大, 一定深度内土壤孔隙度的下降, 尤其是大孔隙的丧失, 是造成导水率下降的重要原因。人为干扰对森林土壤物理性质的演变结果, 一方面影响了土壤的肥力水平, 另一方面也影响了土壤抗侵蚀的能力。当土壤抗侵蚀能力削弱时, 土壤就容易发生水土流失, 造成土壤质量的进一步下降和林地土壤环境的恶化。

在森林生态系统中, 凋落物作为联系地上植被与土壤的中间载体, 是森林土壤有机质和养分的主要补给者, 在维持土壤肥力、促进森林生态系统正常的生物循环、养分平衡和土壤物理结构等方面起着重要作用。土壤有机质是植物养分元素循环的中心, 影响水分关系和侵蚀潜力, 在土壤结构中是一个关键因子^[57], 有机质库的动态稳定是森林生态系统健康运行的基础。分析表明, 随人为干扰强度的增加, 土壤田间持水量和孔隙度降低, 容重增加, 且均与土壤有机质含量呈极显著相关。因此, 土壤有机质的变化是本研究区土壤物理性质变化的主要原因。这是由于土壤有机质含量增加, 一方面改善了土壤结构, 使容重减少, 空隙度增加; 另一方面也改善了土壤的胶体状况, 使土壤的吸附作用增强。森林土壤中的有机质主要来源于森林凋落物, 其性质和数量是影响有机质积累的主要因素。人为干扰活动每年从林地以凋落物的形式直接取走大量养分, 使林地有机质降低, 导致相关土壤物理性质的恶化。

人为干扰低时,林下植被茂盛,有机质大量积累,会在地表形成“林褥层”,减轻了降雨对地表土壤结构的击溅破坏。林地内枯落物蓄积量越大,表层土壤的孔隙度也越大,土壤结构越疏松,越容易使大量的地表径流渗入土壤,并在重力作用下渗透到土壤下层变成地下水,同时,较高的孔隙度不仅有利于纵向水分渗透,而且有利于横向的水分渗透,缩短了渗透时间。退化土壤孔隙结构极不合理,总孔隙和非毛管孔隙较小,土壤保水和供水能力相对较差,土壤板结、紧实,结构性能差,一旦遇上降雨,土壤上层水分很快达到饱和状态,加之植被缺乏,雨水直接击打表层土壤,由于有机质低,土体极易分散,堵塞土壤孔隙,从而造成孔隙被堵塞,土壤初渗率和稳渗率均较低,达到稳渗时间较短,使土壤径流和流速增大,导致严重的水土冲刷,又进一步加剧了土壤退化。

据测定,在无人干扰时,人工油松林枯落物层蓄积量达 $14.95\text{t}/\text{hm}^2$,最大持水量达 $23.03\text{t}/\text{hm}^2$ 。在大气平均降水量 383.6mm 时,枯枝落叶截留量 44.4mm ,平均截留率达 11.6% 。由于枯落物截留,使得林地净雨量减少,从而减少了产生土壤侵蚀的地表径流量,对保持水土具有积极作用。此外,枯落物的截留还使次降水实际产生径流的雨强减小,降低了土壤侵蚀的剧烈程度,削弱了暴雨可能引起的土壤侵蚀。大气降水进入人工油松林系统后,在地表枯落物层的截持和防止雨滴击溅、阻滞径流速度等的综合作用下,林地产生径流的净雨量减少,径流的侵蚀能量和挟沙能力减少,因而使林地的水土流失在无干扰时大为降低。

总之,人为干扰引起油松人工林土壤退化的机理:一方面是由于收集枯落物致使土壤有机质含量降低,土壤胶结物质减少,土壤结构体稳定性变差;地表枯落物减少,增加了雨水对土壤的冲蚀;另一方面,人为活动踏实地面,造成土壤孔隙状况恶化。这些因素使土壤物理性变差,如稳定性尤其是水稳性降低,分散性增强,加上退化导致纵向裂隙发育,胀缩剧烈,小颗粒逐步填充了土壤孔隙,使土壤变的紧实,容重增加,孔隙度减少,土壤持水能力下降,最终出现了土壤紧实化、变性化、粘重化、粗骨化、障碍层高位化等退化现象。因此建议停止放牧、收集地面枯落物等活动,以利于油松人工林的自然更新和维持物种多样性以及改善林地肥力,从而促进油松林的自然恢复。

References:

- [1] Trangmar B B, Yost R S, Uehara G. Application of geostatistics to spatial studies of soil properties. *Advanced Agron*, 1985, 38:44~54.
- [2] Webster R. Quantitative spatial analysis of soil in field. *Advanced Soil Sci*, 1985, 3:1~10.
- [3] Robertson G P, Huston M A, Evans F C, *et al.* Spatial variability in a successional plant community: pattern of nitrogen availability. *Ecology*, 1988, 69(5):1517~1524.
- [4] Sarch E J, Prtel M, Wilson S D, *et al.* Temporal heterogeneity of soilmoisture in grassland and forest. *J. Ecol.*, 2003, 91:234~239.
- [5] Kosmas C, Danalatos N, Moustakas N, *et al.* The impacta of parent material and landscape position on drought and biomass production of wheat under semi-arid condition. *Soil Technology*, 1993, 6:337~349.
- [6] Entin J K, Robock A, Vinnikov K Y, *et al.* Temporal and spatial scales of observed soil moisture variations in the extratropics. *J. Geophys. Res*, 2000, 105(D9):11865~11877.
- [7] Mohanty B P, Famiglietti J S, Skaggs T H. Evolution of soil moisture spatial structure in mixed vegetation pixel during the Southern Great Plains 1997 (SGP1997) Hydrology Experiment. *Water Resour. Res*, 2000, 36(12):3675~3686.
- [8] Pickett S T A, P S White. The ecology of natural disturbance and patch dynamics. Orlando: Academic Press INC, 1985.
- [9] Hobbs R J, L Atkins. The effect of disturbance and nutrient addition on native and introduced annuals in the western Australian wheatbelt. *Australian Journal of Ecology*, 1988, 13:171~179.
- [10] Hobbs R J. Disturbance as a precursor for weed invasion in native vegetation. *Plant Protection Quarterly*, 1991, 6:99~104.
- [11] Hobbs R J, Huenneke L F. Disturbance, diversity, and invasion: implications for conservation. *Conservation Biology*, 1992, 6(3):324~337.
- [12] Li H B, Reynolds J F. On definition and quantification of heterogeneity. *Oikos*, 1995, 73:280~284.
- [13] Mo J M, Peng S L, Sandra Brown, *et al.* Nutrient dynamics in response to harvesting practices in a Pine forest of subtropical China. *Acta Phytocologica Sinica*, 2004, 28(6):810~822.
- [14] Gu J C, Wang Z Q, Han Y Z, *et al.* Effects of harvesting on spatial heterogeneity of soil moisture in secondary forests of Maoershan region. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(8):2001~2009.
- [15] Xue L, Xiang W J, He Y J, *et al.* Effects of different ground clearance on soil fertility of Chinese fir stands. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(8):1417~1421.

- [16] Tian K, Chang F L, Lu M, *et al.* Impacts of human disturbances on organic carbon and nitrogen in napahai wetlands, northwest Yunnan. *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41(5):681~686.
- [17] You S H. The effects of different artificial disturbance on the flora and species diversity of tree layer in *castanopsis carlsis* forest in Wupin Fujian. *Scientia Silvae Sinicae*, 2001, 37(sp1):106~110.
- [18] Yin L W, Gao H J, SHeng C Y, *et al.* Effects of human disturbance on the tree species diversity in community forest of Gaoligong Mountains. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2005, 13(1):42~44.
- [19] Zhu J M, Jiang Z L, Jiang W, *et al.* The effects of human-caused disturbance on species diversity of forest community in northern Fujian Province. *Chinese Biodiversity*, 1997, 5(4):263~270.
- [20] Li Z J, Liu C D, Yang Z W, *et al.* Studies on the species diversity of the closed stable forest and the disturbed forest of *castanopsis eyrei* in Wuyishan National Nature Reserve. *Acta Phytocologica Sinica*, 2000, 24(1):64~68.
- [21] Peng C L, Lin Z F, Lin G Z, *et al.* Effect of human disturbance on antioxidative ability in leaves of subtropical forest woody plants. *Acta Ecologica Sinica*, 1998, 18(1):101~106.
- [22] Bao W K, Liu Z G. Human-induced disturbance regime in the Dagpu vally in the upper reaches of the Minjiang. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 1999, 5(3):233~239.
- [23] Yu P T, Liu H Y, Chen S. Influences of human disturbances on vegetation of Songsan national level nature reserve. *Scientia Silvae Sinicae*, 2002, 38(4):162~166.
- [24] Kong G H, Mo J M. Population dynamics of a human-impacted masson pine plantation in Dinghushan. *Journal of Tropical and Subtropical Botany*, 2002, 10(3):193~200.
- [25] Yang M, Lin S Z, Liu H B, *et al.* The dynamic trends of height niche of main population of natural *Castanopsis eyrei* communities under different human-caused disturbance. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2005, 27(2):172~175.
- [26] Mo J M, Peng S L, Sandra Brown, *et al.* Response of biomass production to human impacts in a pine forest in subtropical China. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(2):193~199.
- [27] Yu L F, Zhu S Q, Ye J Z, *et al.* Evaluation on degradation of Karst forest community and human disturbance. *Chin.J. Appl. Ecol.*, 2002, 13(5):529~532.
- [28] Chen L D, Fu B J. Ecological significance, characteristics and types of disturbance. *Acta Phytocologica Sinica*, 2002, 20(4):581~586.
- [29] Pickett S T A, Kolasa J, Armento J, *et al.* The ecological concept of disturbance and its expression at various hierarchical levels. *Oikos*, 1989, 54:129~136.
- [30] Brown S, Lugo A E. Tropical secondary forests. *J. Trop. Ecol.*, 1990, 6:1~32.
- [31] Brown S, Gillespie A J R, L UGO. Biomass of tropical forests in South and Southeast Asia. *Can. J. For. Res.*, 1991, 21:276~289.
- [32] Brown S, Lenart M, Mo J M, *et al.* Structure and organic matter dynamics of a human-impacted pine forest in a MAB Reserve of subtropical China. *Biotropica*, 1995, 27:276~289.
- [33] Daily G C. Restoring value to the world's degraded lands. *Science*, 1995, 269:350~354.
- [34] FAO. Forest resources assessment 1990: survey of tropical forest cover and study of change processes. FAO Forestry Paper 130, Rome, Italy, 1996.
- [35] Sousa W P. The role of disturbance in natural communities. *Annual Review Ecology System*, 1984, 15:353~391.
- [36] Ding W F, Ding D S. The fractal features of soil granule structure before and after vegetation destruction on Loess Plateau. *Geographical Research*, 2002, 21(6):700~706.
- [37] Zha X, Huang S Y. Effects of vegetation destruction on accelerated erosion and soil degradation degradation processes on Loess Plateau. *Journal of Mountain Science*, 2001, 19(2):109~114.
- [38] Zheng F L, Tang K L, Zhang K L, *et al.* Relationship of eco-environmental change and natural erosion and man-made accelerated erosion. *Acta Phytocologica Sinica*, 1995, 15(3):251~259.
- [39] Zhang X B, Shangguan Z P. The bio-cycle patterns of nutrient elements and stand biomass in forest communities in hilly loess regions. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(3):527~537.
- [40] Zhang X B, Shangguan Z P. Floristic characteristics of seed plants in Ziwuling of Loess Plateau. *Chinese Journal of Ecology*, 2005, 24(8):872~877.
- [41] Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, ed. Soil physical and chemical analysis method. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1978.
- [42] Zhang W R, Xue B D. The method for forest soil. Beijing: China Forest Press, 1986. 30~36.
- [43] Hu J Z, Zhang W H, Li W Z, *et al.* Effect of plant community on anti-erodibility of land under rehabilitation in beichuanhe basin. *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41(6):854~863.
- [44] Tian J R. Primary study on soil physical properties and anti-erodibility index in Lianjiabian areas of Ziwuling Mountain. *Acta Pedologica Sinica*, 1964, 12(3):20~38.
- [45] Tang K L, Zheng F L, Zhang K L, *et al.* Research subjects and methods of relationship between soil erosion and eco-environment in the Ziwuling forest area. *Memoir of Northwestern Institute of Soil and Water Conservation, China*, 1993, 17:3~10.

- [46] Acosta-Martinez V, Reicher Z, Bischoff M, *et al.* The roal of tree leaf mulch and nitrogen fertilizer on turfgrass soil quality. *Biol Fort Soils*, 1999, 29:55~61.
- [47] Whalley W R, Dumitru E, Dexter A R. Biological effects of soil compaction. *Soil Till Res*, 1995, 35:53~68.
- [48] Hernandez T, Garcia C, Reinhardt I. Short-term effect of wildfire on the chemical ,biochemical and microbiological properties of *Mediterranean pine* forest soil. *Biol Forest Soils*, 1997, 25:109~116.
- [49] Lowery B, Swan J. Physical properties of selected soils by erosion class. *Soil Water Conserve*, 1995, 50:306~311
- [50] Mou P, Mitchell R J, Jones R H. Root distribution of two tree species under a heterogeneous nutrient environment. *J. Appl. Ecol.*, 1997, 34:645~656.
- [51] Mo J M, Sandra Brown, Peng S L, *et al.* Effects of human impacts on fine roots and soil organic matter of a pine forest in subtropical china. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(3):491~499.
- [52] Bresler E, Lagan G. Statistical analysis of salinity and texture effects on spatial variability of soil hydraulic conductivity. *Soil Sic. soc. Am J.*, 1984, 48:1~11.
- [53] Peng X H, Zhang B, Zhao Q G. A Review on relationship between soil organic carbon pools and soil structure stability. *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41(4):618~623.
- [54] Jia S H, Cui X M, Li S L, *et al.* Changes of soil physical attributes along grazing gradient. In: Inner Mongolia Grassland Ecosystem Research Station, ed. Research on Grassland Ecosystem No5. Beijing: Science Press, 1996. 12~16.
- [55] Mar áB V, Nilda M A, Norman P. Soil degradation related to overgrazing in the semi-arid southern Caldenal area of Argentina. *Soil Science*, 2001, 166(7):441~452.
- [56] Greenwood K L, MacLeod D A, Hutchinson K J. Long-term stocking rate effects on soil physical properties. *Aust. J. Exp. Agric.*, 1997, 37:413~419.
- [57] Gihacek L J, Swan J B. Effects of erosion on soil chemical properties in the nerth central region of the Unital States. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1994, 40(3):259~265.
- [58] Tisdale J M, Oades J M. Organicmatter and water stable aggregates in soils. *J. Soil Sci*, 1982, 33:141~163.
- [59] Guerif J. Factores influencing compaction-induced increases in soil strength. *Soil & Tillage Research*, 1990, 16:167~178.

参考文献:

- [14] 谷加存,王政权,韩有志,等. 采伐干扰对帽儿山天然次生林土壤表层水分空间异质性的影响. *生态学报*, 2005, 25(8):2001~2009.
- [15] 薛立,向文静,何跃君,等. 不同林地清理方式对杉木林土壤肥力的影响. *应用生态学报*, 2005, 16(8):1417~1421.
- [16] 田昆,常凤来,陆梅,等. 人为干扰对云南纳帕海湿地土壤碳氮变化的影响. *土壤学报*, 2004, 41(5):681~686.
- [17] 游水生. 不同人为干扰强度对米槠林乔木层组成和物种多样性的影响. *林业科学*, 2001, 37(专刊 1):106~110.
- [18] 尹利伟,郭辉军,盛才余,等. 人为干扰对高黎贡山社区森林树种多样性的影响. *中国生态农业学报*, 2005, 13(1):42~44.
- [19] 朱锦懋,姜志林,蒋伟,等. 人为干扰对闽北森林群落物种多样性的影响. *生物多样性*, 1997, 5(4):263~270.
- [20] 李振基,刘初钿,杨志伟,等. 武夷山自然保护区郁闭稳定甜槠林与人为干扰甜槠林物种多样性比较. *植物生态学报*, 2000, 24(1):64~68.
- [21] 彭长连,林植芳,林桂珠,等. 人为干扰对亚热带木本植物叶片抗氧化能力的影响. *生态学报*, 1998, 18(1):101~106.
- [24] 孔国辉,莫江明. 人为干扰对鼎湖山马尾松种群动态的影响. *热带亚热带植物学报*, 2002, 10(3):193~200.
- [22] 包维楷,刘照光. 岷江上游大沟流域驱动植被退化的人为干扰体研究. *应用与环境生物学报*, 1999, 5(3):233~239.
- [23] 于澎涛,刘鸿雁,陈杉. 人为干扰对松山自然保护区植被的影响. *林业科学*, 2002, 38(4):162~166.
- [26] 莫江明,彭少麟, Sandra BROWN,等. 鼎湖山马尾松植物养分积累动态及其对人为干扰的响应. *植物生态学报*, 2004, 28(6):810~822.
- [27] 喻理飞,朱守谦,叶镜中,等. 人为干扰与喀斯特森林群落退化及评价研究. *应用生态学报*, 2002, 13(5):529~532.
- [28] 陈利顶,傅伯杰. 干扰的类型、特征及其生态学意义. *生态学报*, 2002, 20(4):581~586.
- [36] 丁文峰,丁登山. 黄土高原植被破坏前后土壤团粒结构分形特征. *地理研究*, 2002, 21(6):700~706.
- [37] 查轩,黄少燕. 植被破坏对黄土高原加速侵蚀及土壤退化过程的影响. *山地学报*, 2001, 19(2):109~114.
- [38] 郑粉莉,唐克丽,张科利,等. 自然侵蚀和人为加速侵蚀与生态环境演变. *生态学报*, 1995, 15(3):251~259.
- [39] 张希彪,上官周平. 黄土丘陵区主要林分生物量及营养元素生物循环特征. *生态学报*, 2005, 25(3):527~537.
- [40] 张希彪,上官周平. 黄土高原子午岭种子植物区系特征研究. *生态学杂志*, 2005, 24(8):872~877.
- [41] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析. 上海:上海科学技术出版社, 1978.
- [42] 张万儒,许本彤. 森林土壤定位研究法. 北京:中国林业出版社, 1986. 30~36.
- [43] 胡建忠,张伟华,李文忠,等. 川河流域退耕地植物群落土壤抗蚀性研究. *土壤学报*, 2004, 41(6):854~863.
- [44] 田积容. 子午岭连家砭地区土壤物理性质与土壤抗蚀指标的初步研究. *土壤学报*, 1964, 12(3):21~38.
- [45] 唐克丽,郑粉莉,张科利,等. 子午岭林区土壤侵蚀与生态环境关系的研究内容与方法. *中国科学院西北水土保持研究所集刊*, 1993, 17:3~10.
- [53] 彭新华,张斌,赵其国. 土壤有机碳与土壤结构稳定性关系的研究进展. *土壤学报*, 2004, 41(4):618~623.
- [54] 贾树海,崔学明,李绍良,等. 牧压梯度上土壤物化性质的变化. 见:中国科学院内蒙古草原生态系统定位研究站编, 草原生态系统研究(第5集), 北京:科学出版社, 1996. 12~16.