

# 黄土高原不同土地利用方式分层植被的盖度差异

吕渡<sup>1,2</sup>, 张晓萍<sup>1,3</sup>, 刘宝元<sup>3</sup>, 何亮<sup>3</sup>, 贺洁<sup>3</sup>

(1.中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100;

2.中国科学院大学, 北京 100049; 3.西北农林科技大学 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

**摘要:** [目的] 分析不同土地利用方式黄土高原植被的覆盖状况, 为监测该区植被特别是非绿色植被盖度的变化提供数据支持, 为遥感估算植被覆盖度(FVC)在土壤侵蚀预测中的应用提供可靠依据。[方法] 选择黄土高原不同土地利用类型的 7 块植被样地, 采用样带法进行逐半月的分层植被盖度调查, 分析了绿色植被盖度( $f_{PV}$ )和非绿色植被盖度( $f_{NPV}$ )在不同类型以及不同层次结构下的年内变化, 为侵蚀过程模型中植被因素的获取提供参数。[结果] ①沙地、草地、人工柠条林地、人工油松林地、黄陵和秦岭的天然林地等 6 个样地中, 植被的年内投影总盖度变化不大。投影  $f_{PV}$  和其所占投影总盖度的比例年内均随时间先逐渐增加, 7—9 月达到最大值, 其后迅速减小。而投影  $f_{NPV}$  随时间的变化趋势与  $f_{PV}$  相反。受耕作制度影响, 耕地投影  $f_{PV}$  和  $f_{NPV}$  年内变化剧烈。②7—9 月, 在黄陵和秦岭的天然林样地, 投影  $f_{PV}$  比例可达 100%, 其他 4 种样地分别可达 60.6%, 70.5%, 58.8% 和 84.9%, 意味着仅考虑投影  $f_{PV}$ , 将忽略占总盖度 39.4%, 29.5%, 41.2% 和 15.1% 的  $f_{NPV}$  的生态效益。③人工柠条、人工油松林地, 黄陵、秦岭的天然林地等 4 种具有明显植被垂直结构的样地中, 乔木层、灌木层和地表层的  $f_{PV}$  与  $f_{NPV}$  的年内变化与投影  $f_{PV}$  与  $f_{NPV}$  的变化趋势基本一致; 4 种样地植被的投影总盖度与地表层总盖度呈线性关系, 其相关性可达 0.85 ( $R^2$ )。[结论] 黄土高原不同土地利用方式耕地投影  $f_{PV}$  和  $f_{NPV}$  年内变化剧烈, 其他样地年内投影  $f_{PV}$  先增加后减小, 投影  $f_{NPV}$  与其相反。占总投影盖度的 15.1%~41.2% 的投影  $f_{NPV}$ , 在该区是不可忽略的地被组成。不同层次的  $f_{PV}$  和  $f_{NPV}$  年内变化趋势与投影  $f_{PV}$  和  $f_{NPV}$  一致, 地表层总盖度与投影总盖度也存在显著的线性相关性。在区域监测时应重点关注耕地植被盖度的提取季节与地表总盖度。

**关键词:** 植被投影盖度; 垂直分层盖度; 非绿色植被盖度; 土地利用方式; 黄土高原

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2022)05-0165-09

中图分类号: S771, TP79

**文献参数:** 吕渡, 张晓萍, 刘宝元, 等. 黄土高原不同土地利用方式分层植被的盖度差异[J]. 水土保持通报, 2022, 42(5): 165-173. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.20220414.001; Lyu Du, Zhang Xiaoping, Liu Baoyuan, et al. Vegetation cover stratification of different land uses on Loess Plateau [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(5): 165-173.

## Vegetation Cover Stratification of Different Land Uses on Loess Plateau

Lyu Du<sup>1,2</sup>, Zhang Xiaoping<sup>1,3</sup>, Liu Baoyuan<sup>3</sup>, He Liang<sup>3</sup>, He Jie<sup>3</sup>

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water

Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing

100049, China; 3. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** [Objective] The vegetation cover of the Loess Plateau under different land uses was analyzed in order to provide data support for monitoring the changes of vegetation cover in the region, especially non-photosynthetic ( $f_{NPV}$ ) vegetation cover, and provide a reliable basis for the application of remote sensing estimation of vegetation cover in soil erosion prediction. [Methods] Seven vegetation sample plots under different land use types on the Loess Plateau were selected. A stratified vegetation cover survey was carried out at half-month intervals by the sample band method. Then the intra-annual changes of  $f_{PV}$  (photosynthetic vegetation) and  $f_{NPV}$  for different vegetation types and layers were analyzed, thereby providing data support for acquiring vegetation factors for an erosion process model. [Results] ① The total projected cover of the six communities (i.e., sand land, grassland, artificial *Caragana korshinskii* forest, artificial *Pinus tabulaeformis*,

收稿日期: 2022-02-09

修回日期: 2022-03-25

资助项目: 国家自然科学基金面上项目“黄土高原径流泥沙过程对土地利用变化和植被演替的响应及其区域差异”(41877083)

第一作者: 吕渡(1992—), 女(汉族), 陕西省西安市人, 博士研究生, 研究方向为生态遥感。Email: lvdu18@mails.ucas.ac.cn.

通信作者: 张晓萍(1971—), 女(汉族), 河南省焦作市人, 博士, 研究员, 博士生导师, 从事区域水土保持研究。Email: zhangxp@ms.iswc.ac.cn.

forest, and two natural forests at Huangling and Qinling area) did not vary significantly during the year. Both the projected  $f_{PV}$  and its proportion to total projected cover increased gradually over time and reached maximum values in July to September, and then decreased rapidly after September. However, the projected  $f_{NPV}$  showed the opposite change over time than observed for projected  $f_{PV}$ . The projected  $f_{PV}$  and  $f_{NPV}$  of agricultural land varied dramatically within a year because of the influence of tillage factors. ② During July to September, the proportion of projected  $f_{PV}$  was up to 100% in Huangling and Qinling natural forests, and 60.6%, 70.5%, 58.8%, and 84.9% in the other four species, respectively. This means that only considering the projected  $f_{PV}$  would ignore the ecological benefits of the  $f_{NPV}$  that account for 39.4%, 29.5%, 41.2%, and 15.1% of the total cover. ③ In the vegetation types with obvious vertical structure, such as artificial *C. korshinskii* forest, *P. tabuliformis* forest, and the two natural forests in Huangling and Qinling area, the intra-annual changes of  $f_{PV}$  and  $f_{NPV}$  in the tree layer, bush layer, and surface layer were generally consistent with the trend of the projected  $f_{PV}$  and  $f_{NPV}$ , respectively. The projected total cover of the four plots was positively related to the total cover of the surface layer ( $R^2$  values up to 0.85). [Conclusion] The projection  $f_{PV}$  and  $f_{NPV}$  of agricultural land with different land use in Loess Plateau varied dramatically within the year, while the projection  $f_{PV}$  increased and then decreased in other sample sites within the year, and the projection  $f_{NPV}$  was the opposite of them. The projected  $f_{NPV}$ , which accounted for 15.1% to 41.2% of the projected total cover, was a non-negligible ground cover component in the area. The intra-annual trends of  $f_{PV}$  and  $f_{NPV}$  at different layer were consistent with the projected  $f_{PV}$  and  $f_{NPV}$ , and there was also a significant linear correlation between the total surface cover and the projected total cover. The extraction season of FVC of agricultural land and total surface cover should be focused on during regional monitoring.

**Keywords:** projected vegetation projection cover; vegetation cover stratification; non-photosynthetic vegetation cover; different land use types; Loess Plateau

群落的绿色植被(绿叶)和非绿色植被(枝条、枯叶、落叶、作物残茬等)结构和功能状况,影响着陆地生态系统水、碳等物质循环,也影响着侵蚀营力的动力和能量聚集和耗散<sup>[1]</sup>。植被是地表侵蚀等过程模型中的关键因子<sup>[2-5]</sup>。植被的水土保持功能是其不同垂直分层结构综合作用的结果<sup>[6]</sup>。南方红壤侵蚀区的研究表明,与只有两层结构的乔—草或灌—草型,以及单层结构的乔木型植被相比,有完整的乔—灌—草三层结构的植被,其水土保持效益更优<sup>[7]</sup>,林下土壤侵蚀量更小<sup>[8]</sup>。在黄土高原也有相似的结论,不完整的群落结构往往会加剧水土流失<sup>[9-10]</sup>。而草被及枯落物等近地表植被,则被认为是决定水土保持效益的关键层次<sup>[11]</sup>。

长期以来,在水土保持定量评价方面,大多使用植被覆盖度(fractional vegetation cover, FVC)<sup>[12]</sup>作为重要指标。FVC一般指包括乔、灌、草和农作物在内所有植被的冠层、枝叶在地面的垂直投影面积占总面积的百分比<sup>[13]</sup>。样地尺度上,FVC的信息一般可以通过传统的测量方法获得,按照原理可以分为目视估测法、仪器法、采样法<sup>[14]</sup>。目视法简单快捷但是估测精度较低,采样法可以分为样点法、样带法,其估算精度高但是工作量大。仪器法主要是利用相机对样方拍照,再利用监督分类等软件程序获得植被覆盖度<sup>[15]</sup>。然而无论哪种方法,被实际应用在野外的植

被调查时,通常却只考虑林地的绿色冠层的郁闭度,关于贴地表的盖度也只关注绿色草本的覆盖度<sup>[16]</sup>。在区域尺度上则需要利用遥感技术,然而区域尺度估算 FVC 的研究,大多集中在使用 NDVI 产品估算的投影绿色植被盖度(fractional photosynthetic vegetation cover,  $f_{PV}$ )<sup>[17-19]</sup>,随着 Hyperion 等高光谱影像的应用,开始更多地关注非绿色植被盖度(fractional non-photosynthetic vegetation cover,  $f_{NPV}$ )的估算<sup>[20]</sup>。然而较高的投影植被盖度并不能代表植被丰富的垂直空间层次和较高的林下盖度。林下盖度估算不足会严重影响到地表侵蚀等过程模型中植被参数的获取及模型精度<sup>[21-22]</sup>。

黄土高原地处半湿润半干旱地区,其地形破碎,植被稀疏,降水集中,水土流失严重,生态功能脆弱<sup>[23]</sup>。1999年黄土高原实施“退耕还林还草”工程后,基于遥感产品的投影  $f_{PV}$  明显增加<sup>[24]</sup>,然而对植被群落垂直分层盖度,尤其地表层盖度数量变化分析还很不足。以实地调查为基础,定量掌握黄土高原生态脆弱地区不同植被的垂直分层盖度特征,对认识遥感投影植被盖度的水土保持意义、土壤侵蚀量的模型估算,评估水土流失治理工程的效果均有重要的意义。该区的主要土地覆被类型包括耕地(38%)、森林(16%),草地(37%),灌木林(1%),裸地(4%)<sup>[25]</sup>。本研究选择了黄土高原不同土地利用下的 7 块样地

作为研究对象,逐半月/逐月调查了其植被的垂直分层盖度,分析了不同土地利用下以及不同结构层次下的植被的绿色盖度和非绿色盖度的年内变化,及其与投影盖度间的关系。研究真实反映该区植被的覆盖状况,将为监测该区植被特别是非绿色植被盖度的变化提供数据支持,为遥感估算 FVC 在土壤侵蚀预测中的应用提供可靠依据。

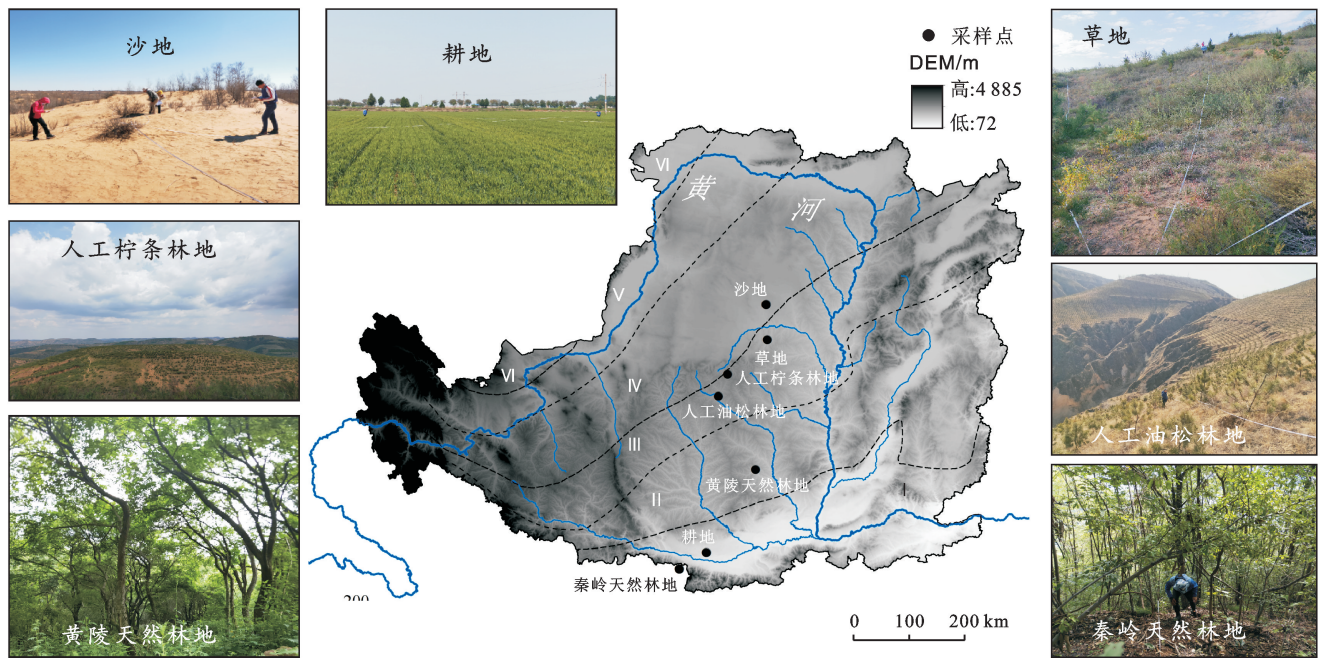
## 1 研究区概况和调查方法

### 1.1 研究区和调查样地

研究区位于中国黄土高原(100°52′—114°33′E, 33°41′—41°16′N,图 1),面积约  $6.24 \times 10^5$  km<sup>2</sup>。该

区属于大陆性季风气候,年平均气温 9~12℃,年平均降雨量 440 mm(100~800 mm),呈现从东南向西北递减趋势。地势西北高、东南低,海拔 72~4 885 m。相应地,从东南向西北植被、土壤表现出明显的地带性特征。

该区典型地貌类型主要包括黄土丘陵沟壑区和黄土高原沟壑区,约占黄土高原面积的 70%<sup>[25]</sup>。本研究借助 Google Earth 工具,广泛调查了黄土高原植被分布特征,根据植被带划分规律,从南至北选择了 7 块 2 km×2 km 大小的均质样地,代表不同的土地利用类型,进行定点逐月观测试验,样地位置见图 1,样地基本信息见表 1。



注: I 为暖温带南部落叶阔叶林带; II 为暖温带北部落叶阔叶林带; III 为温带森林草原带; IV 为温带典型草原带; V 为温带荒漠草原带; VI 为温带草原化荒漠带<sup>[26]</sup>。

图 1 黄土高原植被带、采样点分布及景观

表 1 黄土高原 2019 年不同土地利用类型下 7 个样地基本信息

样地名称	土地利用类型	经纬度	地貌/坡向/坡度	主要植被种类	有关说明
沙地	沙地	109.35 E, 38.16 N	平缓沙地	猪毛蒿, 柠条, 沙柳, 杨树*	半固定沙丘
草地	草地	109.19 E, 37.83 N	丘陵/东/5°	针茅*, 黄蒿, 棘豆	
人工柠条林地	灌木林地	108.40 E, 37.26 N	丘陵/东/15°	针茅, 星毛委陵菜, 柠条*	位于吴起县周湾林场, 约 60 a 林龄, 行间距 2×2 m。
人工油松林地	疏林地	108.22 E, 36.89 N	丘陵/东/15°	针茅, 铁杆蒿, 狗娃花, 油松*	位于吴起县柴沟流域, 5 a 林龄, 行间距 3×3 m。
黄陵天然林地	乔木林地	109.01 E, 35.72 N	山地/东/25°	针茅, 牛蒡, 忍冬, 茶条槭*	
秦岭天然林地	乔木林地	107.55 E, 34.07 N	山地/东/25°	艾蒿, 莓草, 盐肤木, 栎树*	
耕地	耕地	108.07 E, 34.35 N	平原	冬小麦*, 玉米*	位于陕西关中地区, 轮作方式是每年 10 月种冬小麦, 次年 6 月收获后种玉米, 10 月收获玉米。

注: 带有“\*”的植被是该样地中的优势种。

## 1.2 植被覆盖度调查

本研究采用样带法<sup>[27]</sup>,于 2019 年全年逐半月野外调查样地中植被绿色、非绿色植被和裸地的盖度。受天气与路程影响,实地测量与计划时间可能有 3~5 d 的时间差。具体调查中,使用 3 个 100 m 长的皮尺,从样方中心点出发,使其交叉呈星形布设,对于平行播种的农业作物样地,在确定中心点后,使用 2 个 100 m 长的皮尺,使其交叉并与田垄呈 45°角。沿着横断面每隔一米,记录不同植被层次的盖度类型。黄土高原林区的垂直结构比较清晰,实际操作中,按照地表层、灌木层和乔木层的植被覆盖情况进行调查和记录。其中乔木层定义为高度 > 2 m 的乔木,中间灌木层定义为高度 < 2 m 的小灌木,本研究中的油松幼龄林树高基本都小于 2 m,因此将其乔木层归在灌木层去分析。在地表层,记录了地表所有能看见的成分,包括草本植被绿叶、绿色结皮等(PV),枯枝、枯叶、干叶等(NPV),黑色结皮、裸土、岩石、土壤物理结皮等(BS)。中间灌木层,记录内容包括灌木层绿叶(PV)、灌木层枝条和枯叶等(NPV)。乔木层则记录乔木层绿叶(PV)、乔木层枝条和枯叶(NPV)。分地表层、中间灌木层和乔木层,按 PV, NPV 和 BS 这 3 类地物进行计数,分别除以总数(300 或 200),计算出样方内每个层次的  $f_{PV}$ ,  $f_{NPV}$  和  $f_{BS}$ 。再按照上层优先,其次中层的原则,逐点统计出植被重叠后的投影植被盖度。共得到 61 组有效的分层盖度和垂直投影盖度数据。

## 2 结果与分析

### 2.1 典型样地投影盖度年内变化

图 2 显示了 7 种样地中投影绿色( $f_{PV}$ )和非绿色植被( $f_{NPV}$ )覆盖度以及投影总盖度( $f_{PV} + f_{NPV}$ )在年内的变化情况。总体来看,在 6 种自然样地(除耕地)中,投影  $f_{PV}$  均基本随着时间变化逐渐增加,不同样地的  $f_{PV}$  达到年内峰值的时间略有差别,但是集中在 7—9 月,之后迅速下降,在 11 月初基本达到 4 月的水平。 $f_{NPV}$  与  $f_{PV}$  的年内变化趋势相反,在春夏逐渐降低,9 月之后逐渐增加。自然群落的  $f_{BS}$  在年内略呈下降态势,对应的投影总盖度呈增加趋势,但是均不明显,之后不再做详细描述。

沙地样地的投影  $f_{PV}$  和  $f_{NPV}$  在 6 种天然植被样地中最低,且年内变化趋势不大。 $f_{PV}$  在 3—5 月基本为零,随着时间变化  $f_{PV}$  逐渐增加,在 9 月中旬达到最大值 19.31%。全年裸沙占比( $f_{BS}$ ) 在 3 月最大,达到

了 80%,随着秋季杨树叶的凋落和覆盖,11 月初沙地的  $f_{NPV}$  迅速增加达到年内最大值 47.3%,裸露面积降为全年最低为 50.3%。草地和人工油松林地的  $f_{PV}$  在 9 月才达到峰值,分别为 56.6% 和 69.3%。人工柠条林地的  $f_{PV}$  在 7 月初就达到峰值 50.8%,这可能与该区不均匀的局部降水和小气候等因素有关,表现了该区植被的多样性与复杂性。植被盖度随时间变化特征的差异还体现在两种天然林样地中,黄陵天然林地在 4 月中旬的时候开始返青,而更偏南的秦岭林地则在 4 月初就开始返青。且黄陵在 9 月中旬的时候  $f_{NPV}$  就开始增加,秦岭天然林地在 9 月中旬还没有开始枯黄。显示出南北不同的物候特征。两种天然林地的投影  $f_{PV}$  和  $f_{NPV}$  最大值均分别出现在 7 月和 3 月初,且都达到了 95% 以上。耕地样地的植被盖度年内变化非常频繁,年初由于绿色冬小麦的生长,样地  $f_{PV}$  快速增加,6 月初小麦逐渐成熟变黄, $f_{NPV}$  随之增加。6 月中旬收割小麦,由于秸秆还田, $f_{NPV}$  达到了全年峰值 80%。7 月后,随着玉米的生长, $f_{PV}$  又逐渐增加, $f_{NPV}$  逐渐减小,11 月初,农民收割玉米及其秸秆,并对该样地进行了翻耕,因此  $f_{BS}$  达到年内峰值 85%。

$f_{PV}$  占投影总盖度的比例随绿色植被生长而逐渐增加,在 7—9 月占比最大,PV 成为主要的地表覆被。黄陵、秦岭的天然林在 7 月的投影  $f_{PV}$  占投影总盖度比例几乎为 100%。然而在沙地样地中,9 月时  $f_{PV}$  仅占投影总盖度的 60.6%,9 月时草地和人工油松林地的  $f_{PV}$  占总盖度的 70.5% 和 84.9%,7 月人工柠条林地的  $f_{PV}$  仅占总盖度的 58.8%。可见若在遥感方法中,仅仅将基于 NDVI 指数估算得到的  $f_{PV}$  作为区域植被覆盖度,从样地尺度上来看,最高会忽略占比 41.2% 的投影  $f_{NPV}$ , 以及其可能产生的生态效益。

### 2.2 典型样地不同层次盖度年内变化

本研究中,人工柠条林地、人工油松林地、黄陵天然林地、秦岭天然林地等 4 种样地中,均存在明显的植被分层。研究将重点分析这 4 种样地的不同层次的  $f_{PV}$  和  $f_{NPV}$  在年内的变化情况。黄土高原的天然油松群落很少有灌木层出现,本研究中的油松也属于幼龄林,树高在 2 m 左右,因此将其乔木层归为灌木层分析。但是对于黄陵和秦岭的天然林地,作为阔叶乔木林,其乔木层、灌木层和草被层都是群落的重要组成部分。但乔木层的覆盖明显影响着林下的灌木层盖度,天然林地的灌木层盖度较柠条灌木层盖度小。

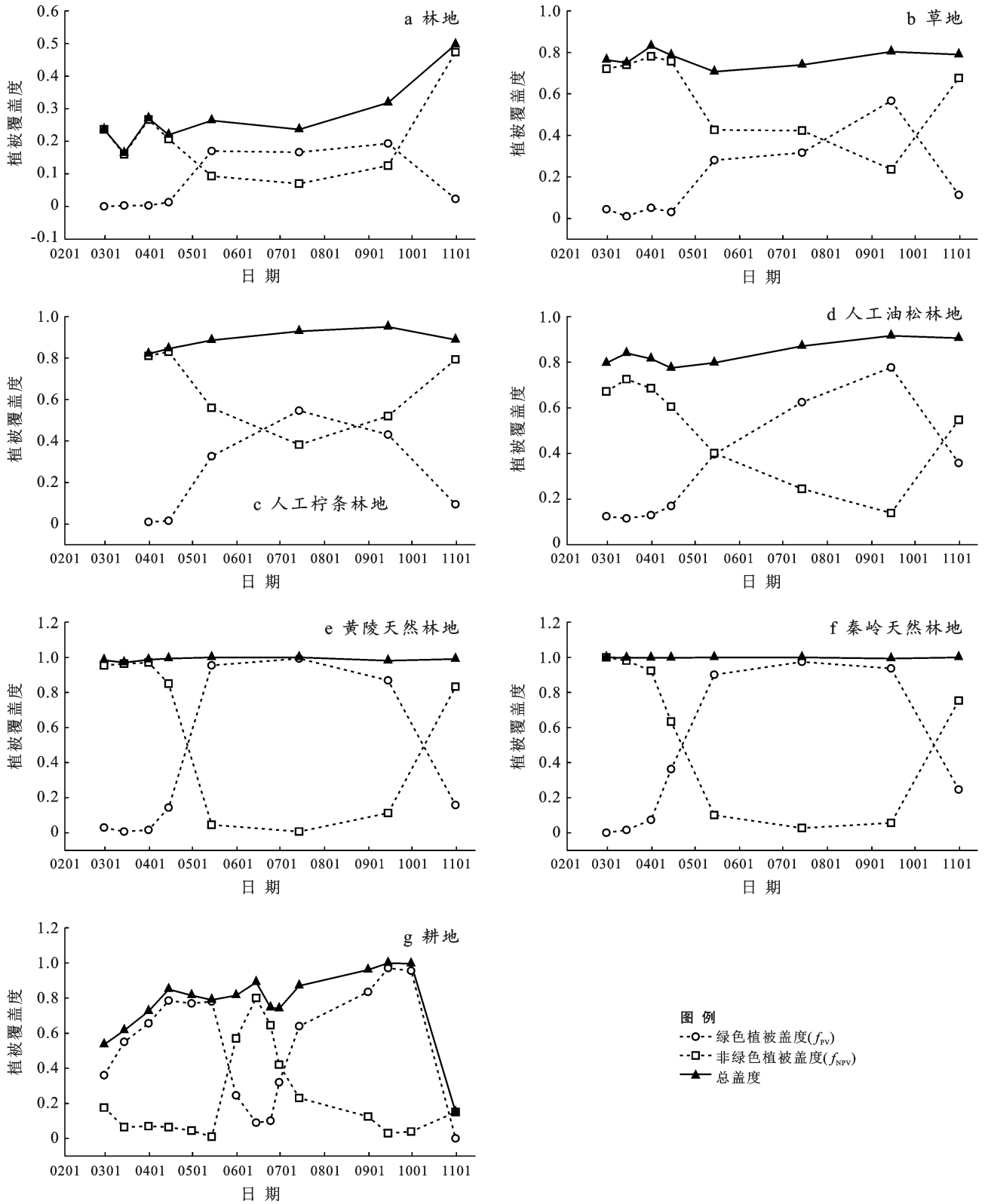


图2 不同土地利用类型样地的植被投影总盖度和投影绿色植被盖度( $f_{PV}$ ),非绿色植被盖度( $f_{NPV}$ )年内变化

图3显示,4种样地的乔、灌层 $f_{PV}$ 和 $f_{NPV}$ 随时间的变化趋势和地表层的基本一致,符合物候变化规律。每一层的 $f_{PV}$ 和 $f_{NPV}$ 随时间的变化趋势也基本相反。在7—9月的生长旺盛季,人工柠条林地和人工油松林地在9月中旬的地表植被总覆盖度最高,达

到了95.0%和88.6%,黄陵和秦岭天然林地在7月中旬的地表植被总覆盖度最高,达到了94.8%和99.3%。而当月4个样地的投影总盖度分别是95.0%,91.6%,100%和100%。其投影的 $f_{PV}$ 分别是43.1%,77.7%,99.3%和93.0%。可见,在本研究的样地中,将投影的

$f_{PV}$ 加 $f_{NPV}$ 的总盖度作为实际样地的植被盖度,尽管垂直结构中重叠部分的覆盖信息被忽略,但也可以体现地表植被盖度的贡献。若从投影的角度但是仅考

虑 $f_{PV}$ ,那么就会有一定程度的损失掉地表的盖度信息,尤其是对于本研究中郁闭度较小的人工柠条和油松林地,分别少考虑了54.6%和12.3%。

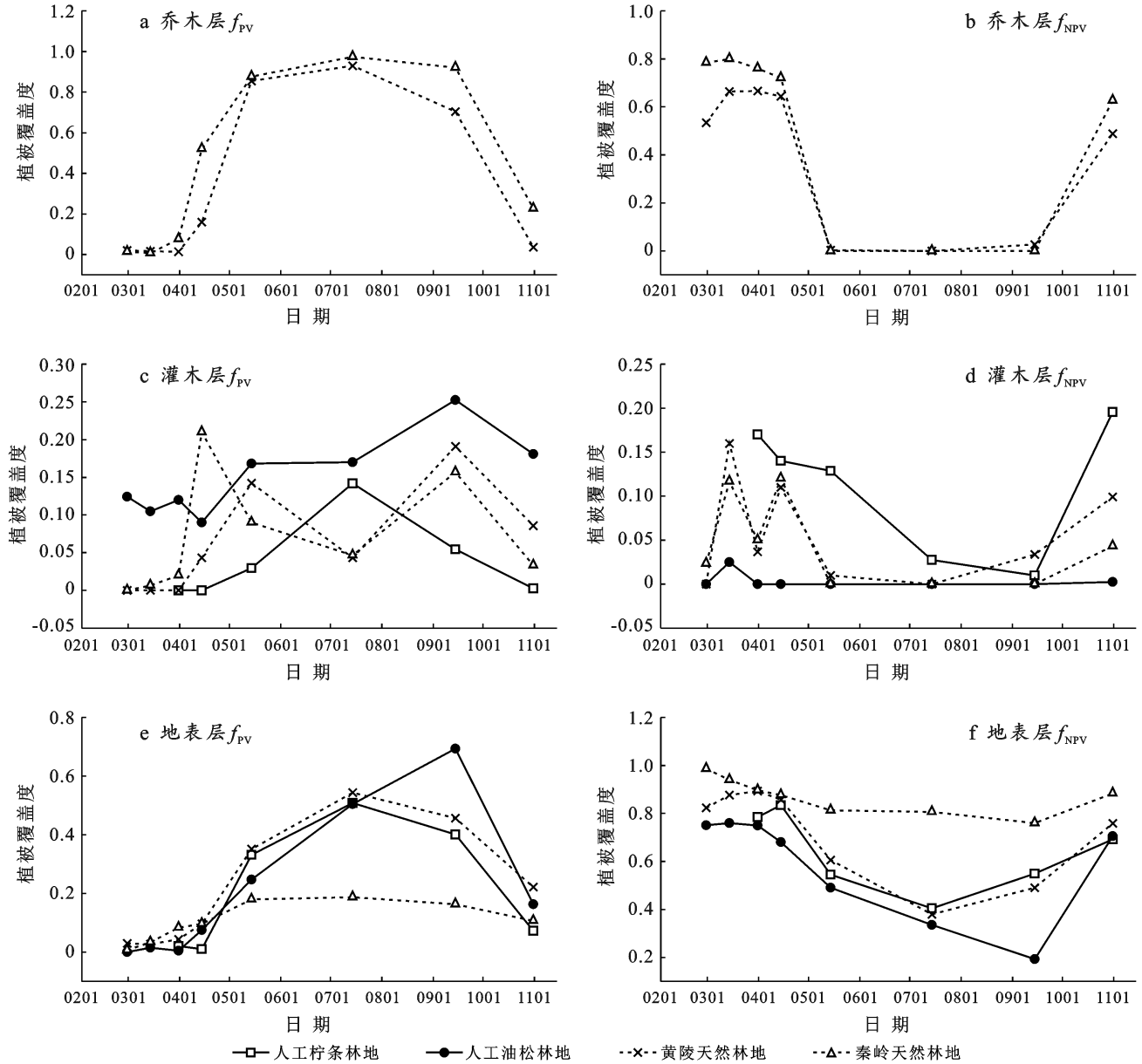


图3 不同土地利用类型样地的不同植被结构层次的绿色植被盖度( $f_{PV}$ )和非绿色植被盖度( $f_{NPV}$ )年内变化

### 2.3 投影盖度与地表层植被盖度的关系

为了分析植被层次间盖度的符合性,进一步分析了4种样地的投影盖度和地表层盖度间的相关性,见表2。4种样地中,地表层实测的 $f_{PV}$ 与投影 $f_{PV}$ 之间、实测 $f_{NPV}$ 与投影 $f_{NPV}$ 之间,均有极显著的线性关系( $p < 0.01$ )。人工柠条林地和人工油松林地的地表实测的总盖度与投影总盖度和投影的 $f_{PV}$ 均有显著的线性关系( $p < 0.05$ )。可能说明在人工灌木林地或者在稀疏的人工乔木林地,可以通过大量的调查数据,建立更佳的投影总盖度与地表层总盖度的经验关

系。对本研究的黄陵天然林地来说,地表层的总盖度与投影总盖度之间的线性经验关系不明显。可能对于茂密的天然林地来说,地表层的总盖度在全年都接近100%,没有明显的季节变化趋势,所以与投影总盖度之间不存在线性关系。

## 3 讨论

### 3.1 两种统计方法对投影盖度统计的结果对比

实地调查投影植被盖度时,有不同的统计方法。本文基于对投影盖度中上、中、下层的优先等级,通过

逐点核对得到每个样方的投影盖度。而 Guerschman 等<sup>[28]</sup>在澳大利亚稀树草原使用样带法进行调查投影盖度时,基于不同植被层次各自的植被盖度,考虑各层次优先度和所占比例,统计出了植被样方的投影盖度。该方法比较灵活且简化了逐点核对的工作量。采用比例法计算出了样地的投影盖度,与本研究中使用

的逐点核对法的结果进行了对比(见图 4)。对于  $f_{PV}$  和  $f_{NPV}$ ,两种方法统计的投影盖度,均显著线性相关, $R^2$  都达到了 0.99。

可见,在本研究的 4 种样地中,Guerschman 的统计方法适用性也较好。可以将其计算方法在投影盖度的计算中进行推广。

表 2 地表层植被盖度(x)与投影盖度(y)的线性回归关系

样地	地表层 $f_{PV}$ 与投影 $f_{PV}$ 回归关系	地表层 $f_{NPV}$ 与投影 $f_{NPV}$ 回归关系	地表层总盖度与投影总盖度回归关系
人工柠条林地(n=6)	$y=1.0564x+0.0007, R^2=0.99^{**}$	$y=1.1096x-0.0554, R^2=0.94^*$	$y=0.5142x+0.4447, R^2=0.52^*$
人工油松林地(n=8)	$y=0.9689x+0.1306, R^2=0.98^{**}$	$y=0.9844x-0.0717, R^2=0.97^{**}$	$y=0.8586x+0.1557, R^2=0.93^{**}$
黄陵天然林地(n=8)	$y=2.0856x-0.0648, R^2=0.90^{**}$	$y=2.1688x-0.9497, R^2=0.89^{**}$	$y=0.11x+0.8858, R^2=0.18$
秦岭天然林地(n=8)	$y=6.0921x-0.2136, R^2=0.89^{**}$	$y=5.3837x-4.1269, R^2=0.87^{**}$	$y=0.0979x+0.9022, R^2=0.86^{**}$
总体(n=30)	$y=1.3025x+0.1137, R^2=0.52^{**}$	$y=1.1248x-0.2213, R^2=0.44^{**}$	$y=0.831x+0.1883, R^2=0.85^{**}$

注:以上回归分析进行显著性检验, \*\*  $p < 0.01$ , \*  $p < 0.05$ , “n”表示用于拟合的数据量。

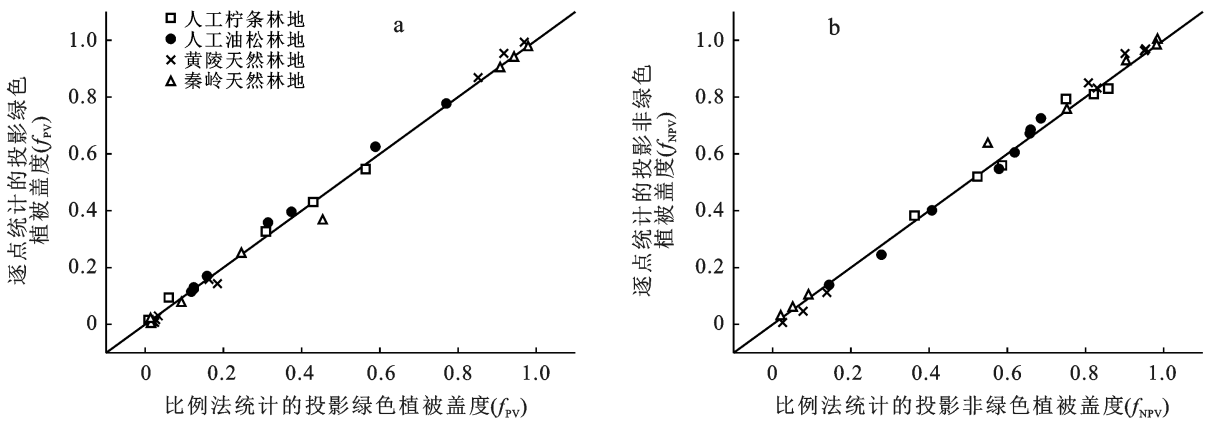


图 4 比例法和逐点核对法获取的植被投影盖度之间的关系

### 3.2 投影盖度和地表层盖度差异性分析

投影  $f_{PV}$  与实际的样地覆被之间差异较大。沙地、草地、人工油松林地和人工柠条样地的全年最大  $f_{PV}$  也仅分别占其总投影盖度的 60.6%, 70.5%, 84.9% 和 58.8%。人工柠条样地因其中优势种柠条已经有 60 a 的林龄, 样地中有不少老龄的枯死植株, 因此  $f_{NPV}$  占比最大。整体呈现随着降雨量减少,  $f_{NPV}$  占比越大的趋势。可见, 通过传统的投影  $f_{PV}$  来指征黄土高原地区的植被盖度, 在植被覆盖非常高(95%)的乔木林样地中能保证一定的精度, 但是对于干旱半干旱区的草原带、荒漠草原带的实际植被盖度, 则会有一定程度的低估。

具有多层结构的植被群落与单一结构的群落相比, 在减少侵蚀方面更有优势<sup>[29]</sup>。不同的植被类型, 在垂直结构上有差异, 进而也会对土壤侵蚀有不同的影响。地表层覆盖度越高的植被类型, 年径流量<sup>[30]</sup>和土壤侵蚀量<sup>[31]</sup>往往越低。关注地表层覆盖的特征与其变化应该是该地区利用植被恢复来保持水土的

关键。研究对比了 4 种具有垂直结构的样地, 来对比其投影盖度与地表层盖度的差异。由以上分析可知, 人工柠条、人工油松林地、黄陵和秦岭天然林地中年内最高地表总盖度为 95.0%, 88.6%, 94.8% 和 99.3%, 这个结果高于王晗生等<sup>[32]</sup>所得出的水土保持临界盖度(40%~60%)。同期的投影总盖度为 95.0%, 91.6%, 100% 和 100%。可见, 在使用遥感技术时, 与直接利用 NDVI 反演的投影  $f_{PV}$  相比, 包含了 NPV 盖度信息的投影总盖度, 更能准确地反映该区植被的地表层信息。表 2 的线性拟合结果也验证了两者的相关性 ( $R^2 = 0.85$ )。

### 3.3 植被因子在水土流失评价中的量化

植被作为水土流失治理的关键, 植被因子的量化是预测土壤侵蚀、评价水土保持效益的重点。然而传统的投影盖度并不能全面反映乔、灌、草等不同层次的水土保持能力的差异<sup>[33]</sup>。王国梁等<sup>[34]</sup>组建了群落结构变化系数, 基于不同封禁期的群落内乔、灌、草 3 层中物种数的变化, 衡量了垂直结构的变化状况, 综

合考虑了群落物种在不同层的变化情况。胡建忠等<sup>[35]</sup>采用了层次分析法,给不同的植被层次的赋权重,对黄河上游山区各种植被结构的优劣进行了综合评判。以上研究都是对植被重建过程中群落结构变化的评价,并没有将植被因子量化表达在侵蚀预报中。雷婉宁等<sup>[36]</sup>提出的结构化植被指数初步考虑了植被各层次影响土壤侵蚀的差异性,避免了垂直投影盖度的不足。但仅用简单相加的关系来表征植被各层次对土壤侵蚀的影响,对于各个层次作用具体的耦合关系还要进一步研究。

有研究认为,植被群落的投影盖度往往会低于群落总盖度,然而二者并未存在必然的关联性,不能直接进行大小比较<sup>[37]</sup>。本研究尝试建立了地表总盖度与投影总盖度的关系,发现两者呈显著的正相关关系。当然这可能是由于本研究的典型植被样方盖度数据是按照时间顺序采集的,乔、灌、草各层盖度的变化本来就存在季节的一致性。今后的研究将着重调查尽可能多的植被类型和土地利用类型,分析其在垂直方向上盖度的差异。当然投影盖度并不能直接反映植被的生态功能,本文仅仅做一个探索,样地的分层盖度的调查方法的准确性还需要长期观测结果的验证。

在区域土壤侵蚀动态监测的实际应用中,常见的水土流失预测模型,如在 USEL, RUSLE 和 WEPP 等模型<sup>[3-5]</sup>中,均是以植被覆盖与管理因子(C)作为参数量化植被在侵蚀防治中的作用,C 因子也往往采用植被盖度进行表征<sup>[38]</sup>。仅仅从垂直维度上反映植被状况,就会忽略植被结构上的差异,所以较高的植被盖度并不代表良好的水土保持效益。黄健熙等<sup>[39]</sup>研究表明,若仅以投影覆盖度作为 C 因子指标纳入区域侵蚀量的计算,会导致土壤侵蚀评价结果出现较大误差。刘宝元的 CSLE<sup>[2]</sup>模型中考虑到了植被结构,采用除林冠以外的所有植被的林下盖度 GD(乔木林下的盖度,取值范围为 0~1)作为重要因子,能够全面反映乔、灌、草等不同覆盖层对土壤的保持能力。目前 GD 的获取方法是按实地调查或者经验取值,本研究的数据积累将为这部分参数提供重要的数据参考。即人工柠条林地, GD 为 0.95,人工油松林地, GD 为 0.88,天然林地, GD 为 0.99。

## 4 结论

本研究基于 2019 年逐半月/月对黄土高原 7 种样地垂直结构盖度的观测数据,分析了不同样地中绿色( $f_{PV}$ )和非绿色植被( $f_{NPV}$ )投影盖度以及不同样地中乔木层、灌木层、地表层盖度年内变化。

(1) 除耕地外,其他不同土地利用类型下植被的投影  $f_{PV}$  随时间变化有一致性,都是先逐渐增加,在 7—9 月达到最大值随后减小,投影  $f_{NPV}$  随时间的变化趋势与  $f_{PV}$  相反。而耕地的  $f_{PV}$  和  $f_{NPV}$  年内变化剧烈,因此在区域监测时应重点关注耕地植被盖度的提取季节。

(2) 干旱半干旱区样地中的非绿色植被的投影盖度在夏季仍可占总投影盖度的 15%~41%,应该作为该区不可忽略的主要地被组成。

(3) 具有垂直结构的典型林地中,不同层次的  $f_{PV}$  和  $f_{NPV}$  随时间的变化趋势,与其投影  $f_{PV}$  和  $f_{NPV}$  一致,地表层总盖度与投影总盖度也存在显著的线性相关性,可为未来建立遥感监测的投影盖度与地表盖度的关系提供参考。

研究结果可为监测该区  $f_{PV}$  和  $f_{NPV}$  的变化提供数据和方法支持,为黄土高原土壤侵蚀预报模型中的植被因子提供参考。

## [ 参 考 文 献 ]

- [1] Parmesan C, Yohe G. A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems [J]. *Nature*, 2003, 421(6918): 37-42.
- [2] Liu Baoyuan, Zhang Keli, Xie Yun. An empirical soil loss equation [C]// Proceedings of the Proc 12 th ISCO Conference, 2002.
- [3] Renard K, Foster G R, Weesies G, et al. Predicting soil erosion by water: A guide to conservation planning with the revised universal soil loss equation (RUSLE) [M]. United States Government Printing, 1997.
- [4] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning [M]. Department of Agriculture, Science and Education Administration, Washington, D. C., USA, 1978.
- [5] 江忠善, 郑莉莉. 坡面水蚀预报模型研究[J]. *水土保持学报*, 2004, 18(1): 66-69.
- [6] 吴钦孝, 赵鸿雁, 韩冰. 黄土高原森林枯枝落叶层保持水土的有效性[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2001, 29(5): 95-98.
- [7] 陈廉杰. 乌江中下游低效林水土保持效益分析[J]. *水土保持通报*, 1991, 11(6): 17-22.
- [8] 李相玺, 左长清, 姚毅臣, 等. 花岗岩侵蚀区植被层次结构优化模式研究[J]. *水土保持研究*, 1997, 4(1): 202-207.
- [9] 李鹏, 崔文斌, 郑良勇, 等. 草本植被覆盖结构对径流侵蚀动力的作用机制[J]. *中国水土保持科学*, 2006, 4(1): 55-59.
- [10] 李鹏, 李占斌, 张兴昌. 草灌植被拦蓄径流和泥沙有效性研究[J]. *水土保持学报*, 2002, 16(1): 32-34.
- [11] 汪有科, 吴钦孝, 韩冰, 等. 森林植被水土保持功能评价



- [J].水土保持研究,1994,1(3):24-30.
- [12] Zhou P, Luukkanen O, Tokola T, et al. Effect of vegetation cover on soil erosion in a mountainous watershed [J]. *Catena*, 2008,75(3):319-325.
- [13] Gitelson A A, Kaufman Y J, Stark R, et al. Novel algorithms for remote estimation of vegetation fraction [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002,80(1):76-87.
- [14] 张云霞,李晓兵,陈云浩.草地植被盖度的多尺度遥感与实地测量方法综述[J].*地球科学进展*,2003,18(1):85-93.
- [15] 池宏康,周广胜,许振柱,等.草地植被盖度的近距离遥感测定[J].*草业学报*,2007,16(2):105-110.
- [16] 贾昭,简春霞,熊沛枫,等.黄土丘陵区退耕草地群落盖度与地上生物量关系[J].*水土保持研究*,2020,27(1):319-327.
- [17] Chen Ni, Ma Tongyu, Zhang Xiaoping. Responses of soil erosion processes to land cover changes in the Loess Plateau of China: A case study on the Beiluo River Basin [J]. *Catena*, 2016,136:118-127.
- [18] 刘国彬,上官周平,姚文艺,等.黄土高原生态工程的生态成效[J].*中国科学院院刊*,2017,32(1):11-19.
- [19] 赵广举,穆兴民,田鹏,等.黄土高原植被变化与恢复潜力预测[J].*水土保持学报*,2021,35(1):205-212.
- [20] Guerschman J P, Hill M J, Renzullo L J, et al. Estimating fractional cover of photosynthetic vegetation, non-photosynthetic vegetation and bare soil in the Australian tropical savanna region upscaling the EO-1 Hyperion and MODIS sensors [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2009,113(5):928-945.
- [21] Su Shiliang, Hu Yi'na, Luo Fanghan, et al. Farmland fragmentation due to anthropogenic activity in rapidly developing region [J]. *Agricultural Systems*, 2014, 131:87-93.
- [22] 赵其国.我国南方当前水土流失与生态安全中值得重视的问题[J].*水土保持通报*,2006,26(2):8.
- [23] 王正秋.陕北黄土丘陵沟壑区生态环境建设刍议[J].*中国水土保持*,2000(2):14-16.
- [24] 何亮,吕渡,郭晋伟,等.基于 MODIS 的北洛河流域植被盖度变化研究[J].*人民黄河*,2020,42(2):67-71.
- [25] Sun Rui, Chen Shaohui, Su Hongbo, et al. Spatiotemporal variations of NDVI of different land cover types on the Loess Plateau from 2000 to 2016 [J]. *Progress in Geography*, 2019,38(8):1248-1258.
- [26] 王义凤.黄土高原地区植被资源及其合理利用[M].北京:中国科学技术出版社,1991.
- [27] Muir J, Schmidt M, Tindall D, et al. Field Measurement of Fractional Ground Cover: A Technical Handbook Supporting Ground Cover Monitoring for Australia [M]. Australian Government: 2011.
- [28] Guerschman J P, Scarth P F, McVicar T R, et al. Assessing the effects of site heterogeneity and soil properties when unmixing photosynthetic vegetation, non-photosynthetic vegetation and bare soil fractions from Landsat and MODIS data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2015,161:12-26.
- [29] 赵鸿雁,吴钦孝,刘国彬.黄土高原森林植被水土保持机理研究[J].*林业科学*,2001,37(5):140-144.
- [30] Chen Hao, Zhang Xiaoping, Ablu M, et al. Effects of vegetation and rainfall types on surface runoff and soil erosion on steep slopes on the Loess Plateau, China [J]. *Catena*, 2018,170:141-149.
- [31] 赵护兵,刘国彬,曹清玉.黄土丘陵区不同植被类型对水土流失的影响[J].*水土保持研究*,2004,11(2):153-155.
- [32] 王晗生,刘国彬.植被结构及其防止土壤侵蚀作用分析[J].*干旱区资源与环境*,1999,13(2):62-68.
- [33] 焦菊英,王万中,李靖.黄土高原林草水土保持有效盖度分析[J].*植物生态学报*,2000,24(5):608-612.
- [34] 王国梁,刘国彬,刘芳,等.黄土沟壑区植被恢复过程中植物群落组成及结构变化[J].*生态学报*,2003,23(12):2550-2557.
- [35] 胡建忠,郑佳丽,张春霞.黄河上游退耕地植被组成、结构及水保功能评价[J].*中国水土保持科学*,2005,3(2):42-50.
- [36] 雷婉宁.陕北黄土区结构化植被因子指数研究[D].北京:中国科学院研究生院(教育部水土保持与生态环境研究中心),2009.
- [37] 刘金.基于植物群落结构的水土流失植被因子指数研究[J].*水利技术监督*,2018,26(5):147-150.
- [38] 张岩,袁建平,刘宝元.土壤侵蚀预报模型中的植被覆盖与管理因子研究进展[J].*应用生态学报*,2002,13(8):1033-1036.
- [39] 黄健熙,吴炳方,曾源,等.水平和垂直尺度乔、灌、草覆盖度遥感提取研究进展[J].*地球科学进展*,2005,20(8):871-881.