

DOI: 10.5846/stxb201312042886

秦浩,董刚,张峰.山西植物功能型划分及其空间格局.生态学报,2015,35(2):396-408.

Qin H, Dong G, Zhang F. Classification of plant functional types and spatial pattern in Shanxi Province. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(2): 396-408.

山西植物功能型划分及其空间格局

秦 浩¹, 董 刚^{1,2}, 张 峰^{1,2,*}

1 山西大学黄土高原研究所, 太原 030006

2 山西大学生命科学学院, 太原 030006

摘要:随着全球气候变化的加剧,作为沟通陆地生态系统与气候变化的桥梁,植物功能型(Plant Functional Types, PFTs)越来越受到生态学家的关注。PFTs 不仅是简化生态系统复杂性的有效工具,而且可将植物的生理生态过程、生物物理特征及物候变化等引入到动态植被模型中,研究气候变化下的植被反应及其反馈机制。为了在区域尺度上研究气候变化和植被反应,基于“生态-外貌”原则,依据植物特征(如生长型、叶的性状)及其对水分、温度的需求,结合区域的气候与地理条件,对山西植被进行植物功能型的划分,并在此基础上对其空间格局进行分析。结果表明:(1)山西植被可划分为 19 类植物功能型(其中包括 4 类栽培作物功能型),分别是:寒温性常绿针叶林、温性常绿针叶林、寒温性落叶针叶林、温性落叶阔叶林、高寒落叶灌丛、温性落叶灌丛、多年生禾草草原、多年生禾草草甸、多年生禾草草甸、多年生莎草草甸、多年生杂类草草原、多年生杂类草草甸、多年生杂类草草甸、1 年生杂类草草甸、多年生豆科草原、果树、一年一熟栽培作物、一年二熟栽培作物和二年三熟栽培作物。植物功能型的划分和分布与山西植被区划有较好的一致性,基本反映了植物固有特征及其对水热条件的需求。(2)农作物在山西占有较大比重,占植被类型面积的 53.15%,森林类型以温性常绿针叶林和温性落叶阔叶林为主,灌丛类型以温性落叶灌丛为主,草本类型中多年生禾草草甸占较大比例,占草本类型面积的 50.98%。(3)由于水热条件及地理条件的差异,植物功能型(不考虑栽培作物)在各区域表现出较大差异,如多年生杂类草草原主要分布于北部地区,在南部并不存在这种植物功能型;森林类型的功能型主要分布于中、南部地区,且结构复杂、类型多样。(4)除栽培作物表现出较好的整体性和连通性,其他植物功能型均表现出不同程度的破碎化和离散化。(5)山西植物功能型整体上表现出较高的多样性,其中中部地区比其他地区的多样性和破碎化程度高,斑块类型更加趋向于离散的小斑块状,北部地区则以一年一熟栽培作物占明显优势,表现出较强的优势度,而南部地区并没有表现出很强的破碎度或优势度。

关键词:植物功能型;植被特征;景观格局;山西

Classification of plant functional types and spatial pattern in Shanxi Province

QIN Hao¹, DONG Gang^{1,2}, ZHANG Feng^{1,2,*}

1 Institute of Loess Plateau, Shanxi University, Taiyuan 030006, China

2 School of Life Science, Shanxi University, Taiyuan 030006, China

Abstract: Plant Functional Types (PFTs) have been paid increasing attention last decades as the linkage between terrestrial ecosystem and climate change with the intensification of global climate change. PFTs are not only an effective tool to simplify the complexity of ecosystem, but also helpful when exploring the response and feedback mechanism of plant to the climate changes by introducing plant physiological, ecological process, biophysical characteristics and phenological change into the vegetation dynamic model. In order to investigate climate change and response to vegetation at regional scale, PFTs classification system was proposed under the “eco-physiognomy” principle based on plant characteristics (such as vegetative form, leaf traits), thermal characteristics and water availability, combined with the regional climate and

基金项目:科技部科技基础性工作专项(2011FY110300);山西省自然科学基金项目(2013011037-1);山西省回国留学人员科研资助项目(20100012)

收稿日期:2013-12-04; 修订日期:2014-10-29

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: fzhang@sxu.edu.cn

geographical conditions in Shanxi. Furthermore, the spatial pattern of PFTs was discussed in this paper. The results showed that: (1) Nineteen PFTs, including four PFTs of cultivated crops were identified, namely, cold warm-temperate evergreen coniferous forest, warm-temperate evergreen coniferous forest, cold warm-temperate deciduous coniferous forest, warm-temperate deciduous broadleaf forest, cold warm-temperate deciduous shrub, warm-temperate deciduous shrub, perennial grass steppe, perennial grass community, perennial grass meadow, perennial sedge meadow, perennial forbs steppe, perennial forbs community, perennial forbs meadow, annual forbs meadow, perennial Legume steppe, fruit tree, one crop per annual, two crop per annual, and three crop two annual. The classification and distribution of plant functional types reflect the inherent characteristics and demand for water and thermal of plants, being consistent with vegetation regionalization of Shanxi Province. (2) Crops are dominant in Shanxi, accounting for 53.15% of the total vegetation type area. Forest and shrubs types are dominated by warm-temperate evergreen coniferous forest, warm-temperate deciduous broadleaf forest and warm deciduous shrubs, respectively. Perennial grass community occupies a large proportion, accounting for 50.98% of the total area of the herbaceous types. (3) PFTs (except for crop cultivation) show bigger difference in different regions due to hydrothermal and geographical conditions. For example, perennial forbs steppe mainly distributed in north Shanxi, rather than in the south Shanxi. Compared with north Shanxi, the functional types of forest mainly distributed in the central and south Shanxi, and its structure and types were complex and diverse. (4) The cultivation crops show good integrity and connectivity, while the other PFTs show the fragmentation and discretization. (5) PFTs of Shanxi show integrally high diversity. Compared with the other two parts, more fragmentation and higher diversity are found in the central Shanxi. One crop per annual mainly distributed in North Shanxi, while south Shanxi did not exhibit significant fragmentation and dominance.

Key Words: plant functional types; plant characteristics; landscape pattern; Shanxi Province

植被作为生态系统的主要组成部分对全球气候起着反馈调节作用,如通过影响植被与大气之间的物质和能量交换等来影响气候^[1-2]。国际地圈-生物圈计划(International geosphere-biosphere program, IGBP)将“预测气候变化、大气成分和土地利用变化等对陆地生态系统的影响及这些因素如何反馈于全球气候系统”作为其核心项目“全球变化与陆地生态系统(GCTE, Global change and terrestrial ecosystem)”的重要研究内容^[3]。预测全球变化对陆地生态系统结构与功能的影响以及生态系统如何反馈全球气候变化是全球性的环境问题,需要建立全球尺度模型,但如何有效地、定性与定量地描述陆地生态系统植被组成、结构与功能的多样性是建立全球尺度模型的关键。在大尺度范围内用单个植物种进行预测十分复杂,且会受到地理空间的限制;在较小尺度范围内,物种的分布又是多变的,无法有效地捕捉植被与气候系统的相互作用。IGBP 的核心计划 GCTE 将植物功能型(PFTs, Plant Functional Types)列为重要研究内容之一^[4-7]。在全球、区域和局地尺度的研究, PFTs 的划分一方面可以将极为复杂、多样的植物种群划分为相对简单明了的类型,另一方面可以有效地将植物的生理生态过程、生物物理特征及物候变化等因素引入到动态植被模型、生物地理模型、生物地球化学模型、North-East China Woods Competition Occupation Processor(NEWCOP)和全球植被动态模型等模型当中,有助于人们更好地研究全球变化下的植被反应及其反馈机制^[3,8],用以评估全球变化对陆地生态系统的潜在影响及其对全球气候系统的反馈调节^[9-13]。因此,PFTs 在分析生态系统功能、评价生态系统对环境变化的敏感性、预测植被随环境变化而产生的响应等方面具有重要的意义^[14-16]。

PFTs 是基于植物的形态、生理、生活史或其它相关的生态系统过程以及与物种相联系的某些生物学特征来划分的^[6]。植物功能型的分类要考虑植物的结构、功能以及重要的环境限制因子等。划分依据诸如生长型(乔木、灌木、草本等)^[17-20];分配对策(水分保持^[21]、养分保持和繁殖等);代谢特征(阳性与阴性^[22], C3 与 C4^[23]和是否固氮^[24]);生长速度(相对生长速度、养分吸收速度、光合速度^[22]);种子大小、扩散方式^[13]、繁殖类型^[13]等。但由于缺乏全球优势植物对温度、水分、光合作用等功能特征及环境因子的信息,从功能属性角度来划分全球或区域尺度上的植物功能型难度较大^[25]。为了在全球或区域尺度上进行相关研究与比较,需

要建立基于植物关键特征的植物功能型划分方法^[3,26]。倪健根据植物外貌、叶属性以及农作物的光合用途和熟制原则,把我国的 PFTs 划分为 39 类^[26],翁恩生等通过冠层特征以及生理特点(如光合途径、植物的水分需求和热量需求)等原则,建立了一套适合中国气候和植被特征的植物功能型体系^[3]。本文以植物生长型(乔木、灌木和草本)、叶寿命(常绿和落叶)、叶型(阔叶和针叶)、草本植物的生活史及对温度、水分的需求和农作物的熟制等特征为原则,结合山西的地形和小气候环境,基于 1:50 万黄土高原地区植被图(数据来源:中国科学院地理科学与资源研究所绘制的黄土高原地区 1:50 万资源与环境遥感系列图矢量数据集,1987—1990 年),对山西省植物功能型进行划分,以便更好地在区域尺度上进行气候变化对陆地生态系统结构与功能的影响及其对气候反馈的作用研究。

此外,植物功能型作为沟通植物结构和功能与陆地生态系统属性的桥梁,其空间分布格局势必影响着陆地生态系统的结构与功能,如物种分布与组成及生态系统过程等。目前针对植物功能型的空间格局分布研究较少,为此,本文在植物功能型划分的基础上,选取斑块类型面积、边界密度、斑块密度、聚合度指数、景观多样性指数、景观均匀度指数和景观优势度等指标对植物功能型类型的分布特征及异质性进行研究,为进一步了解山西省植物功能型的分布、组成及其空间异质性等提供科学依据。

1 研究区域概况

山西省位于 110°15′—114°32′E,34°35′—40°45′N。山西地形复杂多变,整体上可划分为 3 个明显的地形地貌,即东部的山地、中部的裂隙盆地和西部的高原山地,其中山地面积占全省总面积的 40%,丘陵占 40.3%,平原仅占 19.7%。海拔大都在 1000 m 以上^[27-29]。

山西省属温带大陆性季风气候。境内气候存在显著的垂直变化和南北变化:恒山、内长城以北属温带半干旱气候,内长城与昔阳—太岳山—河津一线之间属暖温带半干旱气候区,此线以南属暖温带半湿润气候区。根据气候区大致可将山西划分为 3 个区,即山西北部、中部和南部。各区域年平均降雨量在 330—600 mm 范围。年平均气温介于 4—14 °C;夏季平均气温 22—27 °C;冬季平均气温在 -12—-2 °C 范围;全年无霜期 4—7 个月^[27]。

受地形和环境因子的影响,山西植被的分布从北到南可分为:北部和西北部的温带灌草丛和草原分布区等;中部以针叶林及中生的落叶灌丛为主、落叶阔叶林次之,是森林分布面积较大的地区;南部和东南部主要以落叶阔叶林和次生落叶灌丛为主,也是植被类型最多、种类最丰富的地区^[28]。

2 研究方法

2.1 植物功能型划分原则与方法

在植物个体进化过程中,植物通过改变自己的形态和生理特征来适应气候的变化,形成了多种多样的结构和功能特征,这些特征对植物的生命活动和生存繁殖是不可或缺的^[3]。在大的空间尺度上,不同区域因气候间的差异形成了不同的植被类型。多种多样的植被特征也赋予了生态系统不同的结构和功能,其中一些植被特征在植物-大气的相互作用及其反馈调节功能中扮演着重要角色。植物的水分和能量需求也主要通过改变植物叶面积、气体交换以及植物体大小等来实现。因此,在大尺度上研究植物功能型的划分以叶片特征为核心是相对可靠且容易实现的^[3]。当然植物对水分、温度和热量的需求也会限制植物的分布情况、群落组成以及各项生理生态指标,如依据植物对水分需求,可以将草本类型大致划分为森林、灌丛、草甸、草丛和草原等。所以,在选择划分指标的时候应考虑植物的水分、温度和热量的需求。另外,耕地面积在山西省占有较大比重,面积为 4.8 万 km²,占全省总面积的 30.6%^[28]。虽然栽培作物受人为因素影响较多,但其栽培模式是人们根据长期经验和当地生态环境条件,在掌握自然规律的基础上摸索出来的;同时栽培作物播种和产量等对气候变化也十分敏感,可以间接反映气候变化的影响。因此,在划分植物功能型时考虑栽培作物的类型和分布对于完善植物功能型的划分具有一定的科学意义。

在综合考虑植物形态和生理特征的基础上,还应适当考虑当地的地形及其小气候环境。针对当地的优势植物种群,开展植物功能型的研究,提出适于当地气候的植物功能型划分方法。本文以植物生长型(乔木、灌木和草本)、叶寿命(常绿和落叶)、叶型(阔叶和针叶)、草本植物的生活史及植物对水分、温度和热量的需求和农作物的熟制为原则,结合山西的地形和小气候环境,基于 1:50 万黄土高原地区植被图,对山西省植物功能型进行划分。

2.1.1 栽培植物功能型划分

在划分栽培植物功能型时,主要考虑栽培植物生长型(果树-农作物)、熟制(一年一熟、一年二熟和二年三熟)及其地理分布范围。共划分为 4 种栽培植物功能型:果树、一年一熟栽培作物、一年二熟栽培作物和二年三熟栽培作物(图 1)。

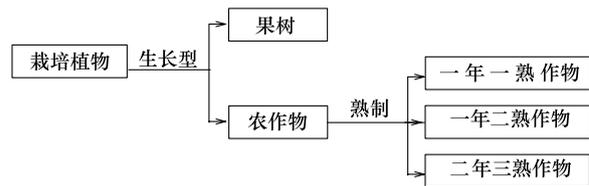


图 1 栽培植物功能型划分

Fig.1 Classification of cultivated plant functional types

2.1.2 自然植被划分

依据植物的生长型,将自然植被划分为乔木、灌木、草本三类(图 2)。

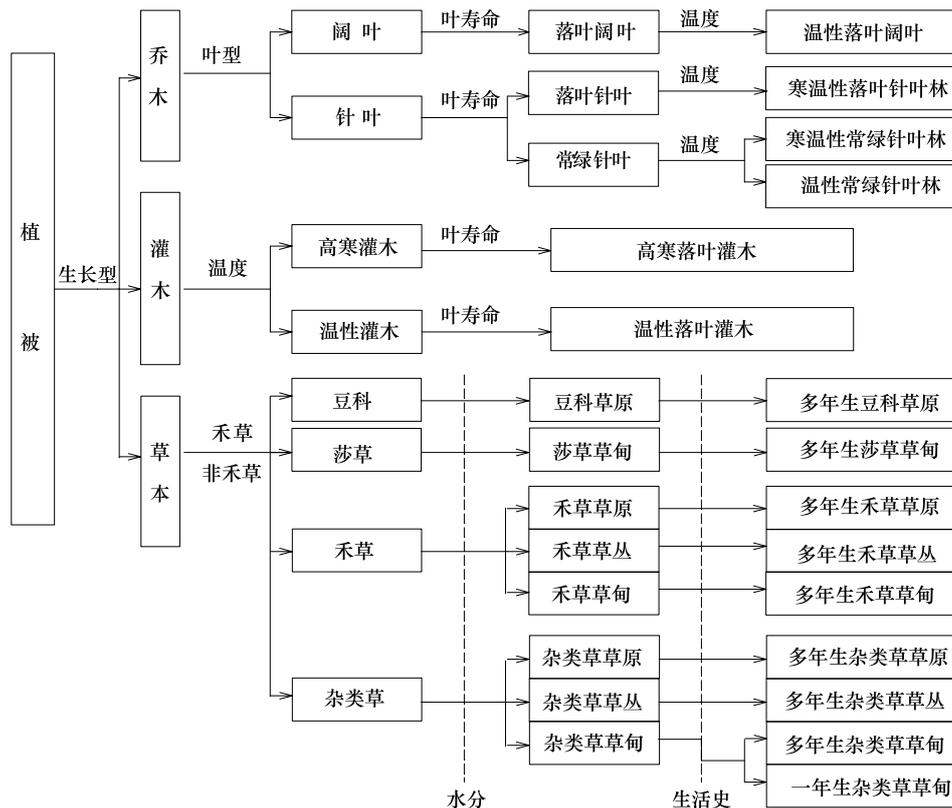


图 2 植物功能型划分

Fig.2 Classification of plant functional types

(1) 乔木植物功能型划分

根据乔木植物叶型(针叶-阔叶)、叶寿命(常绿-落叶)、温度需求(寒性-温性)及其分布范围,将山西乔木划分为寒温性常绿针叶林、温性常绿针叶林、寒温性落叶针叶林、温性落叶阔叶林,共计 4 种乔木植物功能型。

(2) 灌木植物功能型划分

根据灌木植物的温度需求(寒性-温性)及其分布范围,将灌木分为高寒落叶灌木和温性落叶灌木两类植物功能型。

(3) 草本植物功能型划分

根据禾草/非禾草、水分需求、生活史,结合它们各自的地理分布范围,将山西草本植物分为9类草本植物功能型。即多年生禾草草原、多年生禾草草丛、多年生禾草草甸、多年生莎草草甸、多年生杂类草草原、多年生杂类草草丛、多年生杂类草草甸、1年生杂类草草甸、多年生豆科草原。

2.2 植物功能型空间格局分析

植物功能型空间格局分析主要研究相同或不同层次水平上的功能型类别在空间上的分布与组合,综合分析其组成、结构及空间上的异质性,对于了解植物功能型在生态系统与气候变化之间的相互协调中的作用有重要意义。在此,选取景观类型特征分析指标和景观异质性特征分析指标^[30-37]来对所划分的植物功能型进行空间格局分析。

2.2.1 景观类型特征分析指标

景观斑块类型指标包括斑块类型面积(CA)、斑块数(NP)、最大斑块指数(LPI)、斑块平均面积(AREA_MN);景观斑块形状指标包括周长面积分维数(PAFRAC)。

2.2.2 景观异质性特征分析指标

斑块类型水平异质性指标包括景观形状指数(LSI)、斑块密度(PD)、边缘密度(ED)、斑块内聚力指数(COHESION)、聚合度指数(AI);景观水平异质性指标包括 Shannon's 多样性指数(SHDI)、Shannon's 均匀度指数(SHEI)、景观优势度(LDI)、破碎度指数(FI)、蔓延度(CONTAG)、散步与并列指数(IJI)。

上述各个指数的计算,应用 Fragstats 软件完成。

3 结果与分析

3.1 植物功能型类型及其群系组成

根据上述植物功能型划分依据和标准,山西植物功能型共划分为19类,其中乔木4类,灌木2类,草本9类,栽培植物4类(图3,表1)。受地形、水分和温度等因素的影响,山西各区域植物功能型的组成在南北和海拔上存在显著差异。栽培作物从北到南可分为一年一熟作物、二年三熟作物和一年二熟作物。这主要与区域的热量资源有关,如北部大同盆地($\geq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 年积温3300—3500 $^{\circ}\text{C}$)、中部太原盆地($\geq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 年积温4000—4150 $^{\circ}\text{C}$)、南部运城盆地($\geq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 年积温4600—5100 $^{\circ}\text{C}$)^[27]。

乔木类功能型包括寒温性常绿针叶林、温性常绿针叶林、寒温性落叶针叶林、温性落叶阔叶林等,主要分布于山西各大山区。其中温性常绿针叶林和温性落叶阔叶林面积较大,分别占全省植被面积的4.655%和4.37%(表1)。寒温性针叶林主要分布于中、北部的管涔山、关帝山、恒山及五台山等地的阴坡和半阴坡,海拔1800—2700 m,主要群系组成为白杆林(Form. *Picea meyeri*)、青杆林(Form. *Picea wilsonii*)和华北落叶松林(Form. *Larix principis-rupprechtii*)。温性针叶林则以油松林(Form. *Pinus tabulaeformis*)、侧柏林(Form. *Platycladus orientalis*)为主,在山西恒山以南山地分布较广,海拔600—1600 m的阳坡分布较多。温性落叶阔叶林主要分布于南部暖温带地区,如中条山、吕梁山中南、太岳山等,代表性群系包括辽东栎林(Form. *Quercus wutaishanica*)、栓皮栎林(Form. *Quercus variabilis*)等。

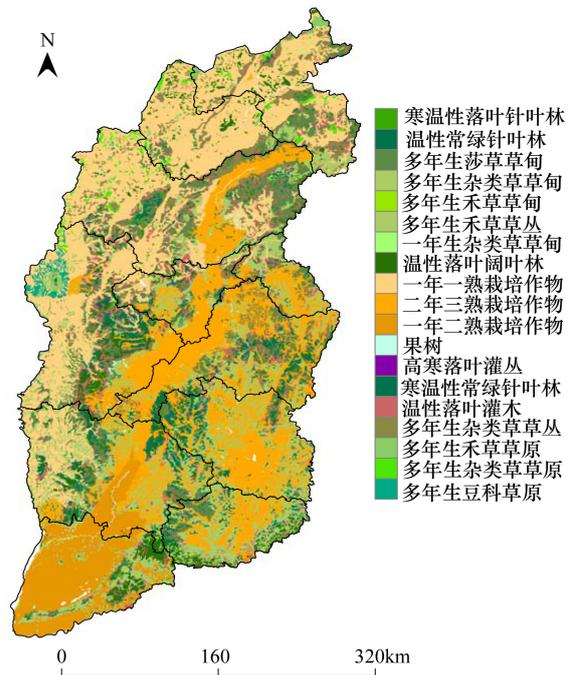


图3 山西植物功能型

Fig.3 Plant functional types of Shanxi

灌木类功能型分为:高寒落叶灌木和温性落叶灌木。灌木生态幅度较广,能适应各种生境,广泛分布于山西各地的山地丘陵和河谷,具有面积大、类型多的特点。灌丛以温性落叶灌丛为主,占灌丛总比例的 99.47%,大多为次生类型,主要分布于 2000 m 以下的山地、丘陵地带^[27]。主要群落类型有荆条灌丛(Form. *Vitex negundo* var. *heterophylla*)、沙棘灌丛(Form. *Hippophae rhamnoides*)、三裂绣线菊灌丛(Form. *Spiraea trilobata*)、黄刺玫灌丛(Form. *Rosa xanthina*)和虎榛子灌丛(Form. *Ostryopsis davidiana*)等。寒温性落叶灌丛分布范围较窄,占植被总面积的 0.03%(表 1),主要局限于管涔山、关帝山、五台山等海拔 2000 m 以上的区域,与亚高山草甸构成亚高山灌丛草甸带。类型相对较少,主要有鬼箭锦鸡儿灌丛(Form. *Caragana jubata*)和金露梅灌丛(Form. *Potentilla fruticosa*)。

表 1 山西植物功能型组成与分布

Table 1 Compositions and distribution of plant functional types in Shanxi

序号 No.	植物功能型 Plant functional types	编码 Code	相对面积/% Relative area	分布范围 Distribution	代表群系 Typical formation
1	寒温性常绿针叶林 Cold warm-temperate evergreen coniferous forest	CWTECF	0.22	主要分布于管涔山、关帝山、恒山及五台山等地,海拔范围 1800—2700 m	白杆林 Form. <i>Picea meyeri</i> 青杆林 Form. <i>Picea wilsonii</i>
2	温性常绿针叶林 Warm-temperate evergreen coniferous forest	WTECF	4.65	主要分布于恒山以南暖温带地区的山地,海拔范围 600—1600 m	油松林 Form. <i>Pinas tabulaeformic</i> 侧柏林 Form. <i>Platycladus orientalis</i>
3	寒温性落叶针叶林 Cold warm-temperate deciduous coniferous forest	CWTDCF	0.17	主要分布于管涔山、关帝山及五台山等地,海拔范围 1800—2700 m	华北落叶松林 Form. <i>Larix principis-rupprechtii</i>
4	温性落叶阔叶林 Warm-temperate deciduous broadleaf forest	WTDBF	4.37	主要分布于恒山以南暖温带地区的山地,海拔范围 600—2200 m	辽东栎林 Form. <i>Quercus wutaishanica</i> 栓皮栎林 Form. <i>Quercus variabilis</i>
5	高寒落叶灌丛 Cold warm-temperate deciduous shrub	CWTDS	0.03	分布于关帝山、管涔山、五台山等海拔 2400 m 以上地带	鬼箭锦鸡儿灌丛 Form. <i>Caragana jubata</i> 金露梅灌丛 Form. <i>Potentilla fruticosa</i> 荆条灌丛 Form. <i>Vitex negundo</i> var. <i>heterophylla</i>
6	温性落叶灌丛 Warm-temperate deciduous shrub	WTDS	5.62	广泛分布于山西各山地及丘陵,海拔范围 400—1800 m	沙棘灌丛 Form. <i>Hippophae rhamnoides</i> 三裂绣线菊灌丛 Form. <i>Spiraea trilobata</i> 黄刺玫灌丛 Form. <i>Rosa xanthina</i> 虎榛子灌丛 Form. <i>Ostryopsis davidiana</i>
7	多年生禾草草原 Perennial grass steppe	PGS	0.59	分布于晋西北和晋北一带的黄土丘陵、土石山地,海拔范围 1300—1700 m	大针茅草原 Form. <i>Stipa grandis</i> 长芒草草原 Form. <i>Stipa bungeana</i>
8	多年生禾草草甸 Perennial grass community	PGC	15.87	广泛分布于山西恒山以南丘陵地带,海拔范围 600—1400 m	白羊草草甸 Form. <i>Bothriochloa ischaemum</i> 黄背草草甸 Form. <i>Themeda japonica</i> 野古草草甸 Form. <i>Arundinella anomala</i>
9	多年生禾草草甸 Perennial grass meadow	PGM	0.03	主要分布于各地河漫滩及冲积平原区	假苇拂子茅草甸 Form. <i>Calamagrostis pseudophragmites</i>
10	多年生莎草草甸 Perennial sedge meadow	PSM	8.95	主要分布于五台山、关帝山、芦芽山 2000 m 以上的亚高山地区	嵩草草甸 Form. <i>Kobresia myosuroides</i> 苔草草甸 Form. <i>Carex</i> spp.
11	多年生杂类草草原 Perennial forbs steppe	PFS	0.81	主要分布于晋北和晋西北的黄土丘陵地区,海拔范围 1200—1700 m	百里香草原 Form. <i>Thymus mongolicus</i> 冷蒿草原 Form. <i>Artemisia frigid</i> 铁杆蒿草原 Form. <i>Artemisia sacrorum</i>

续表

序号 No.	植物功能型 Plant functional types	编码 Code	相对面积/% Relative area	分布范围 Distribution	代表群系 Typical formation
12	多年生杂类草草丛 Perennial forbs community	PFC	3.92	主要分布于恒山以南的黄土丘陵区,海拔范围 1000—1700 m	铁杆蒿草丛 Form. <i>Artemisia sacrorum</i> 华北米蒿草丛 Form. <i>Artemisia giraldii</i>
13	多年生杂类草草甸 Perennial forbs meadow	PFM	0.46	主要分布于河漫滩及山地高海拔地区	罗布麻草甸 Form. <i>Apocynum venetum</i> 杂类草草甸 Form. <i>Aconitum</i> sp.+ <i>Polygonum viviparum</i>
14	1 年生杂类草草甸 Annual forbs meadow	AFM	0.02	主要分布于大同盆地的盐碱地	碱蓬草甸 Form. <i>Suaeda glauca</i>
15	多年生豆科草原 Perennial Legume steppe	PLS	0.48	主要分布于恒山以北地区,海拔 1400 m 以下	达乌里胡枝子草原 Form. <i>Lespedeza davurica</i>
16	果树 Fruit tree	FT	0.21	主要分布于山西中、南部地区	苹果 Apple, 梨 Pear, 枣 Jujube
17	一年一熟作物 One crop per annual	OCPA	24.79	主要分布于太原盆地以北区域	玉米 Corn, 高粱 Sorghum, 莜麦 Oat 等
18	一年二熟作物 Two crop per annual	TCPA	7.34	主要分布于运城,临汾盆地,海拔 400—600 m	小麦 Wheat, 玉米, 棉花 Cotton 等
19	二年三熟作物 Three crop two annual	TCTA	21.02	主要分布于晋东南,晋中地区	玉米, 小麦, 谷子 Millet 等

草本类功能型包括多年生禾草草原、多年生禾草草丛、多年生禾草草甸、多年生莎草草甸、多年生杂类草草原、多年生杂类草草丛、多年生杂类草草甸、一年生杂类草草甸、多年生豆科草原等。根据植物对水分的需求,可将山西的草本划分为草原、草丛和草甸。草丛类功能型由多年生禾草草丛和多年生杂类草草丛组成,在全省分布面积较大,分别占 15.87% 和 3.92% (表 1),大多由多年生中生和旱中生草本植物组成,广泛分布于山西恒山以南丘陵地带,海拔范围为 600—1400 m,其北界可达山西灵丘,向西南一直延伸到临县和兴县之间的紫金山一线^[27],主要有白羊草草丛(Form. *Bothriochloa ischaemum*)、黄背草草丛(Form. *Themeda japonica*)、野古草草丛(Form. *Arundinella anomala*)和蒿类草丛(Form. *Artemisia* spp.)。草甸类功能型主要以多年生莎草草甸和多年生杂类草草甸为主,分别占草甸类型的 94.61% 和 4.86%,多为多年生湿中生、中生草本植物,偏好湿润的环境条件。如苔草草甸(Form. *Carex* spp.)和杂类草草甸(Form. *Aconitum* sp.+ *Polygonum viviparum*)。草原类功能型则由多年生禾草草原、多年生杂类草草原和多年生豆科草原组成,在全省分布面积相对较少,分别占 0.59%、0.81% 和 0.48%。主要分布于山西北部的温带草原,适合干燥、寒冷的气候环境。群系组成主要是大针茅草原(Form. *Stipa grandis*)、长芒草草原(Form. *Stipa bungeana*)、百里香草原(Form. *Thymus mongolicus*)和达乌里胡枝子草原(Form. *Lespedeza davurica*)等。

栽培作物功能型分为果树、一年一熟栽培作物、一年二熟栽培作物和二年三熟栽培作物等。从图 3 可以看出,栽培植物主要集中分布于山西的各大盆地,如大同盆地、太原盆地、长治盆地、临汾盆地和运城盆地。这些盆地同时也是河流的聚集地,为农作物的生长提供了较为充足的水源,如汾河、滹沱河、漳河等。山西一年一熟作物面积最大,占全省植被面积的 24.79% (表 1),主要分布于太原盆地以北地区,该地区年降水量少(370—400 mm),热量资源差($\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 年积温 2200—3200 $^{\circ}\text{C}$),无霜期较短(100—120 d),严重制约了农业生产的发展。作物类型主要是玉米、高粱、莜麦等。其次为二年三熟作物,占全省植被面积 21.02% (表 1),主要分布于忻定盆地、太原盆地和晋东南地区,该区热量资源较好($\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 年积温 3000—3500 $^{\circ}\text{C}$),无霜期较长(150—170 d)。作物类型多以玉米、谷子等主。一年二熟作物对热量的需求较高,主要分布在南部临汾盆地和运城盆地,该区热量资源好($\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 年积温 4000—4500 $^{\circ}\text{C}$),无霜期长(180—200 d),地势平坦,土壤肥厚,水资源丰富,有利于农作物的生产。主要作物有小麦、棉花和玉米等^[28]。

3.2 景观空间格局分析

3.2.1 全省景观格局特征分析

从全省范围来看,耕地面积比例最大,占山西植被总面积的 53.15%(表 1,表 2)。从北到南,随热量和水资源的递增,作物熟制依次为一年一熟、二年三熟和一年二熟,栽培作物在各区域占有较大比重,面积百分比分别为 59.87%、42.78%和 50.65%。斑块平均面积分别为 502.71、749.11 km²和 488.49 km²(表 2),呈现聚集的大斑块类型。斑块间的连接度较好,斑块内聚力指数均在 99%以上,表明土地利用处于有序发展中。从形状指数和聚合度指数来看,一年二熟作物景观形状指数为 9.7327,远低于其他作物类型,而聚合度较高 96.4153%,表现出较好的规则化和聚集化。说明山西南部临汾盆地和运城盆地的立地条件较之中、北部要好,有利于作物的集约化耕作与管理。北部地势起伏大,水资源短缺,土壤质量较差,多为梯田,是黄土高原农作物分布的典型模式。

表 2 山西省景观斑块类型水平格局特征指数

Table 2 Indices of pattern characteristic for landscape class level in Shanxi

序号 No.	斑块类型 面积 CA/ km ²	斑块数 NP/个	最大斑块 指数 LPI/%	斑块平均 面积 AREA_MN/ km ²	周长面积 分维数 PAFRAC	景观形状 指数 LSI	斑块密度 PD/ (个/km ²)	边缘密度 ED/ (m/km ²)	内聚力 指数 COHESION/ %	聚合度 指数 AI/%
1	336.00	34	0.0796	9.8824	1.5769	9.4054	0.0002	0.0446	89.7924	76.2050
2	7259.75	928	0.1249	7.8230	1.4927	47.5249	0.0059	1.0362	89.6537	72.5220
3	258.75	61	0.0197	4.2418	1.4224	10.8615	0.0004	0.0450	80.8029	68.0299
4	6828.75	1236	0.3855	5.5249	1.3987	47.3505	0.0079	0.9844	88.3615	71.7453
5	51.00	20	0.0061	2.5500	1.3763	5.5862	0.0001	0.0104	72.9122	64.9077
6	8776.25	1495	0.1297	5.8704	1.4998	58.4293	0.0096	1.3895	84.7963	69.1616
7	923.75	42	0.2115	21.9940	1.4838	11.4344	0.0003	0.0816	94.8490	82.4849
8	24777.25	885	0.9153	27.9969	1.6140	67.2635	0.0057	2.6732	96.0558	78.8722
9	41.75	12	0.0061	3.4792	1.3417	4.8077	0.0001	0.0074	74.5169	67.8571
10	13974.50	416	0.3871	37.4071	1.5719	33.5614	0.0027	0.7363	94.1988	78.8625
11	1258.25	110	0.0421	11.4386	1.4276	16.8873	0.0007	0.1478	88.3168	77.2672
12	6121.00	329	0.3178	18.6049	1.5891	34.6454	0.0021	0.6884	92.7913	78.3558
13	716.50	18	0.2230	39.8056	1.5496	9.4537	0.0001	0.0654	95.6887	83.7660
14	32.75	6	0.0059	5.4583	N/A	3.0870	0.0001	0.0045	79.9648	79.9163
15	751.75	22	0.3292	34.1705	1.5868	12.8636	0.0001	0.0889	97.1199	77.8963
16	320.75	213	0.0101	1.5059	1.4028	17.5139	0.0014	0.0800	66.8153	52.3256
17	38708.75	77	21.7396	502.7110	1.5321	38.0699	0.0005	1.8703	99.8015	90.5550
18	11462.02	20	6.9913	749.1125	1.3556	9.7327	0.0001	0.2953	99.5379	96.4153
19	32824.46	60	17.8956	488.4917	1.5227	47.5781	0.0004	2.0771	99.8076	86.3528

No.: number; CA: Total Class Area; NP: Number of Patches; LPI: Largest Patch Index; AREA_MN: Patch Area Mean; PAFRAC: Perimeter Area Fractal Dimension; LSI: Landscape Shape Index; PD: Patch Density; ED: Edge Density; COHESION: Patch Cohesion Index; AI: Aggregation Index

自然植被中以多年生禾草草丛占较大比例 15.87%(表 1),该类型广泛分布于山西恒山以南丘陵地带,斑块平均面积 28.00 km²,斑块数达 885 个,禾草草丛的周长面积分维数、边缘密度和景观形状指数均高于其他植被类型,分别为 1.614、2.6732 m/km²和 67.2635 m/km²(表 2)。斑块内聚力指数较高 96.06%,说明斑块间的连通性较好。综合各项指标表明:禾草草丛呈现离散复杂的中型斑块,但斑块间连通性较好。这主要由于人口密度的增加和城市化的加快,为了利用有限的耕地资源,大量的禾草草丛被开垦,造成该类型斑块离散程度较高。同类型斑块间彼此靠狭长窄小的通道相连,斑块间的连通性相对较好。其他草本功能型也表现出不同程度的离散化。如多年生莎草草甸对水分与热量的需求,主要分布于河流两岸及海拔 2000 m 以上的亚高山地带,由于山地地形多变,其周长面积分维数和景观形状指数均较高,分别为 1.5719 和 33.5614,斑块表现

出一定的离散化。

森林类型以温性常绿针叶林和温性阔叶落叶林为主,面积分别占森林总面积的 49.44%和 46.51%。与寒温性针叶林相比,由于分布海拔较低,森林受到人类活动的影响较大,其边缘密度、斑块密度和景观形状指数明显高于寒温性针叶林。如温性常绿针叶林和寒温性常绿针叶林的 LSI 和 ED 分别为 47.5249、9.4054 和 1.0362、0.0446 m/km^2 (表 2)。因此,温性常绿针叶林和温性阔叶落叶林斑块形状趋于复杂狭长状,且分布离散;而寒温性针叶林地处偏远山区,且海拔分布相对较高,受到人为干扰较少,斑块整体保持了较好的聚集性。4 种森林功能型斑块内聚力指数均在 80%以上,表明斑块间的连通性较好,为野生动物提供了较为完整的栖息地,有利于种群的繁殖和迁移。

寒温性落叶灌丛主要局限于管涔山、关帝山、五台山等海拔 2000 m 以上的区域,与亚高山草甸构成亚高山灌丛草甸带,分布面积和范围较小,仅占灌丛总面积的 0.58%。由于山地多变的地形,常导致斑块低的聚合度 64.9077%,出现离散状态,斑块间的连通性也较差,内聚力指数为 72.9122%,整体表现出脆弱的生态结构。温性落叶灌丛适应性强,分布面积较广,面积 8776.25 km^2 ,但整体上斑块平均面积较小 5.87 km^2 (表 2)。由于分布海拔较低,人类干扰较为严重,导致斑块大多呈离散的小斑块状,斑块景观形状指数 58.4293。综合各项景观指标可以看出,温性落叶灌丛整体上呈现离散复杂的斑块类型,斑块彼此间有狭小的通道保持了较好的连通性。

3.2.2 各区域景观格局特征分析

根据气候区的划分,大致将山西划分为 3 个区域,即山西北部(温带半干旱区)、中部(暖温带半干旱区)和南部(暖温带半湿润区),各区域植物功能型的特征指标见图 4 和图 5。

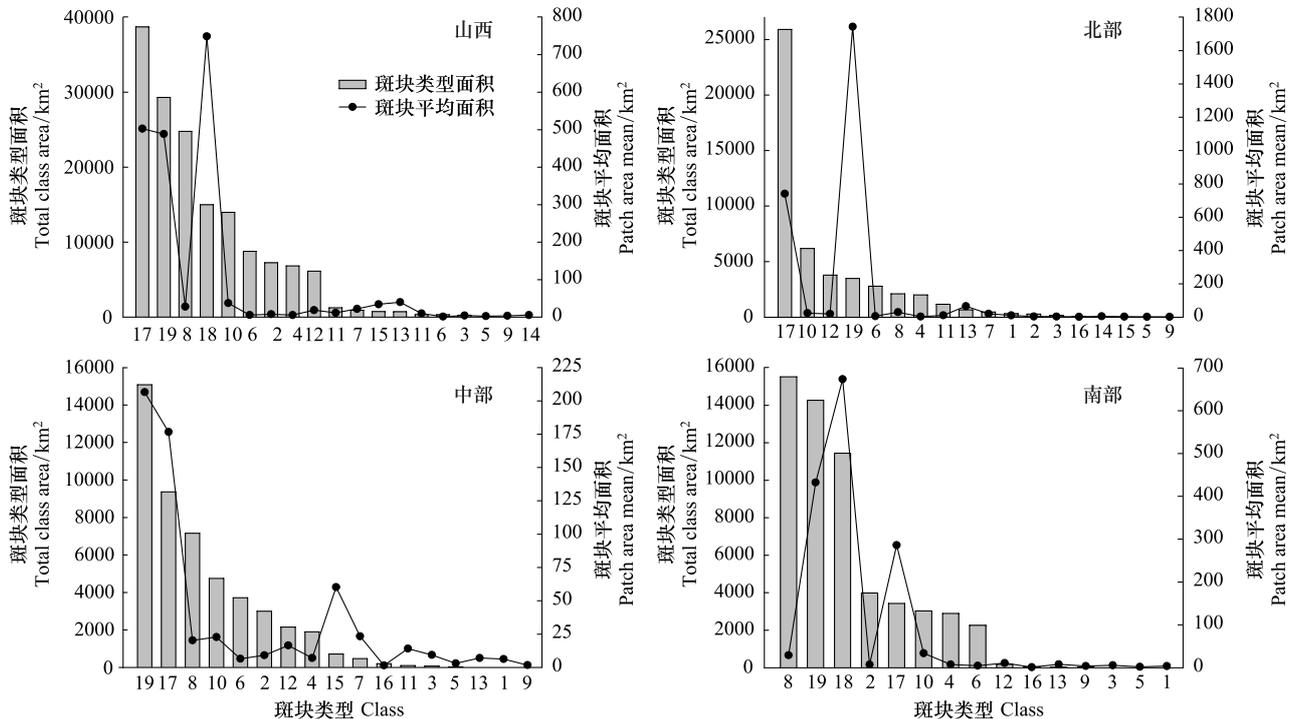


图 4 各区域斑块类型面积和斑块平均面积

Fig.4 Class area and patch average area of different region

从分布面积来看,各区域优势植物功能型类型相似,但面积比例有所差异,这与各地区的地形地貌及其水热条件有关。栽培作物全省以一年一熟和二年三熟作物为主,约占全省植被面积的 45.81%。从北到南,随着地形及水热条件的变化,主要作物类型依次为一年一熟、二年三熟和一年一熟、二年三熟和一年二熟。一年一熟栽培作物在山西北部占绝对优势,约占北部植被面积的 52.24%(图 4)。三种栽培作物类型(除果树)的斑

块内聚力指数分别达到 99.80%、99.54%和 99.81%,表现出较好的整体性和连通性。

中、南部森林类型面积比北部分别多 4154.25 km²和 2243.25 km²,且结构复杂、类型多样,尤以温性常绿针叶林明显。全省 4 种乔木植物功能型的平均斑块面积分别为 9.88、7.82、4.24 km²和 5.52 km²(图 4),均表现出小斑块的特征。

灌丛在各区的分布差异较小,大多为中生或早中生种类,对水分的适应能力比森林类型强;但由于人为干扰的结果,斑块大多表现出小斑块类型。

草本类型以多年生禾草草丛为主,在全省各区均占有较大比例,南部地区表现最为突出,面积达到 15525 km²,斑块平均面积 29.07 km²,斑块数达到 534 个。北部与中、南部表现出明显差异的主要是多年生杂类草草原。该类型的植物功能型为了更好地适应北部地区干旱、寒冷的气候环境,组成物种多以旱生、早中生植物为主。植物形态常以低矮和匍匐状生长,甚至半灌木化,如铁杆蒿(*Artemisia sacrorum*)。

除栽培作物和多年生禾草草丛外,斑块数目与景观形状指数保持了较好的一致性(图 5)。整体而言,各区域内优势植物功能型(除栽培作物)虽占有较大比例(图 4),但斑块数目明显高出其他植被类型,均表现出不同程度的破碎化,且离散程度随斑块数量的增加而递增。栽培作物和多年生禾草草丛出现明显的反差,主要与大面积的禾草草丛被无序开垦有关,致使这两种植物功能型镶嵌分布,导致禾草草丛破碎化和离散程度明显。

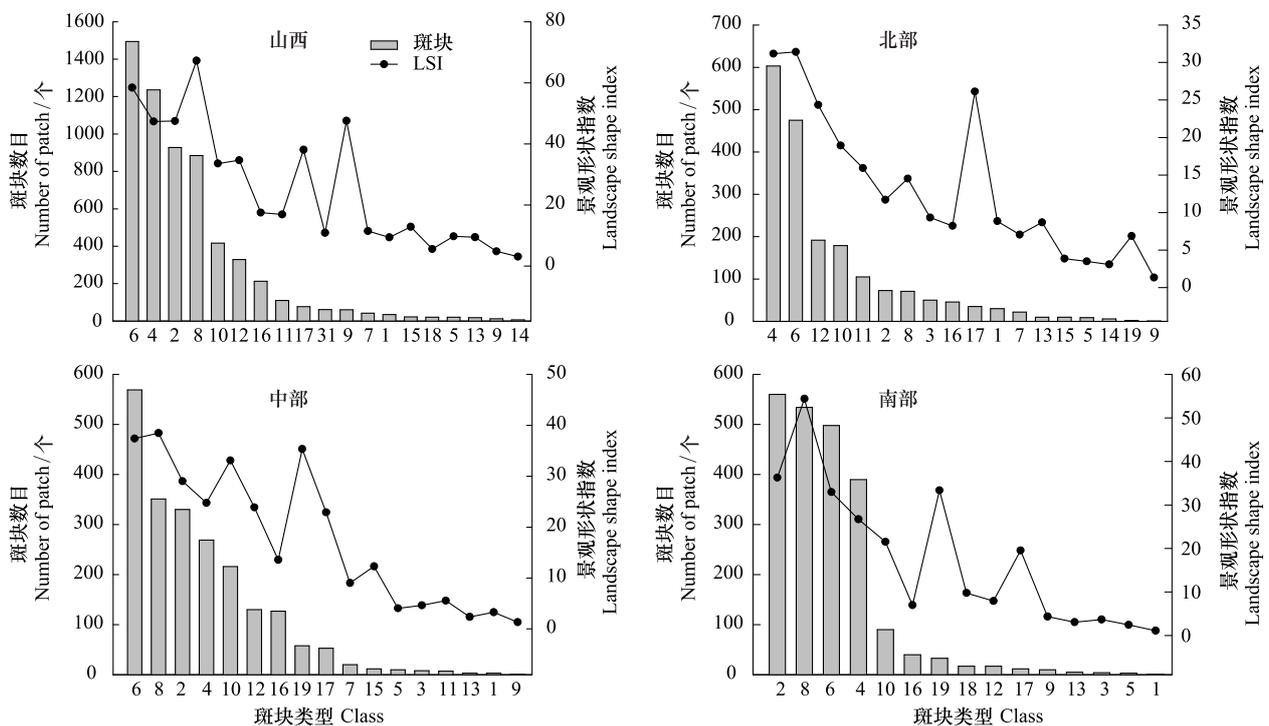


图 5 各区域斑块数目和景观形状指数

Fig.5 Indices of patch number and landscape shape of different region in Shanxi

温性落叶灌丛适应性比森林要强,但由于海拔分布相对较低,受到人为干扰严重,大多为次生灌丛,在全省及各区域呈现出离散的小斑块状。从北到南,温性落叶灌丛的斑块数目依次为 475、569 和 498 个;景观形状指数分别为 31.4、37.39 和 32.98(图 5)。

山西北部由于降水的缺乏,落叶阔叶林大多分布于盆地周围,很难形成较大斑块,斑块平均面积 5.87 km²,致使温性落叶阔叶林在北部的破碎化和离散程度最为严重,斑块数目可达 603 个,景观形状指数 31.17。温性落叶灌丛次之。中、南部地区除灌丛表现出较大的破碎化外,禾草草丛及森林类型由于复杂多变的地势及人类活动的干扰,也表现出不同程度的破碎化。

3.2.3 景观格局异质性分析

综合各种特征指数和异质性指数表明(表3),山西整体 Shannon's 多样性指数(SHDI)为 2.203,表现出较高的多样性,各类型所占比例较均衡;Shannon's 均匀性指数(SHEI)为 0.7236。由于地形复杂,地势起伏多变,整体上景观形状指数较大 67.2378,表现出较强的异质性和复杂性,整体破碎度达到 9.976×10^{-3} 。山西整体呈南北狭长状,东西地形复杂多变,东部太行山、中部裂隙盆地和西部黄土高原和吕梁山,气候表现出明显的水平差异和垂直差异,导致植被垂直分布明显,从低到高依次可划分为:疏林灌丛农田带,阔叶林带,针、阔混交林带,针叶林带,亚高山灌丛带和亚高山草甸带^[28]。

从北到南,各区域的 SHDI 依次为 1.7971、2.1769 和 1.8759(表3),表明山西中部地区多样性最高,北部最低。中部地区地势复杂多变,分布有许多山脉,如吕梁山、太行山和太岳山等,中部为太原盆地,海拔变化明显。该地区较高的景观形状指数 43.4802 和破碎度指数 11.047×10^{-3} ,这表明该地区的斑块破碎化和复杂程度较其他区域要高;景观优势度和 SHEI 均匀性指数均反映出北部较强的优势度。较低的周长面积分维数 1.4384,表明该地区的植被类型斑块形状简单。这主要是因为该地区的植被类型以一年一熟栽培作物为主,占北部区域植被总面积的 52.24%。

表3 景观异质性指数

Table 3 Indices of landscape heterogeneity

指数 Index	山西 Shanxi	北部 North Shanxi	中部 Central Shanxi	南部 South Shanxi
景观总面积 TA/km ²	156806.05	49895.69	49017.57	57892.79
斑块数量 NP/个	6258	1877	2167	2214
景观形状指数 LSI	67.2378	32.3597	43.4802	42.6812
周长面积分维数 PAFRAC	1.4912	1.4384	1.5014	1.4991
蔓延度 CONTAG/%	51.8069	59.7098	50.4599	53.7819
散布于并列指数 IJI/%	65.5434	63.8825	62.6681	57.3930
Shannon's 多样性指数 SHDI	2.2030	1.7971	2.1769	1.8759
Shannon's 均匀性指数 SHEI	0.7236	0.5999	0.7267	0.6766
景观优势度 LDI	0.7414	1.0933	0.6563	0.8322
破碎度指数 FI	0.009976	0.009400	0.011047	0.009556

TA: Total Landscape Area; NP: Number of Patches; LSI: Landscape Shape Index; PAFRAC: Perimeter Area Fractal Dimension; CONTAG: Contagion Index; IJI: Interspersion Juxtaposition Index; SHDI: Shannon's Diversity Index; SHEI: Shannon's Evenness Index; LDI: Landscape Dominance Index; FI: Fragmentation Index

4 讨论

在全球气候变化的大环境下, PFTs 已被广泛地应用于全球陆地生态系统动态变化及其对气候系统的反馈模型。但如何有效地在区域或全球尺度上划分植物功能型是目前面临的问题之一。目前基于世界各地优势植物的水分、热量与光合等功能特征与环境因素关系资料的缺乏,从功能属性特征入手进行植物功能类型的划分面临着巨大挑战。因此,在区域或全球尺度上,应当舍去具体植物多样而又复杂的特征,将植物功能型看作是植物关键特征的组合。这些特征在大的尺度上足以反映区域的生物地理、生物物理和生物地球化学特征,并影响着陆地-大气的相互作用^[3]。

例如倪健^[26]和翁恩生等^[3]基于大的气候带和植被类型对我国的植物功能型进行了划分,分别划分了 39 种和 18 种植物功能型,所选取的原则基本类似,都是选取了植物相关的固有特性和气候因子;相对来说,翁恩生等的划分较多考虑了气象因素,如年均降水量、最暖月平均温度、有效积温、年最热月平均温和最冷月平均温之差等指标^[26]。本文针对山西特定的气候条件和地理环境,基于植被类型,根据植物关键特征及其对水分、温度的需求对植物功能型进行了划分研究。由于研究尺度的不同,在植物功能型的划分原则和方法上会

略有不同,主要表现在以下两方面:1)根据山西土地利用的实际情况,在划分植物功能群时将农作物也作为主要指标之一,这是因为山西的耕地面积占到全省植被面积的 53.15%(表 1,表 2),栽培作物播种的季节、育苗、类型、熟制及产量等均会受到气候变化的明显影响,表现出明显的南北差异性(图 3)。另外,栽培作物的栽培模式明显受到人类活动的控制和影响,通过栽培作物面积和分布的变化可以反映人类对土地利用方式的干扰情况。如山西禾草草丛由于人类大量开垦荒地而遭到严重破坏,呈破碎的小斑块状(图 4,图 5)。2)对于草本植物群落的划分不仅考虑了物种对水分的不同需求,而且考虑了分类学基本性状,将草本划分为禾草/非禾草类、1 年/多年生等类型,使植被功能型更具代表性,并且符合山西植被分布和组成的实际情况。植物功能型的分布反映了植物的关键特征及其对水分、热量的需求。栽培作物对热量的需求在南北表现出明显差异,在北部地区多以一年一熟制为主,而在南部地区则以二年三熟或一年二熟为主。多年生杂类草草原由于对水分、热量的需求等原因,集中分布于山西恒山山脉以北的区域。这些显著的特征反映了区域的生物地理、生物物理和生物地球化学变化特点,有助于间接了解区域气候变化与植被的响应及其调节。

山西的植被类型中栽培作物占有较大的优势,占总植被面积的 53.15%。栽培作物作为人类社会长期生产活动的产物,其生长环境和管理方式明显具有人为因素的印迹,充分反映了人类活动的参与程度和对自然生态环境的干扰程度。斑块类型整体上表现出较好的连通性和聚集性,斑块内聚力和聚合度指数均在 90%以上。自然植被类型的功能型在各区域均表现出一定的破碎化,斑块类型呈现离散的小斑块状,尤以多年生禾草草丛最为严重,其周长面积分维数、边缘密度和景观形状指数均高于其他植被类型,分别为 1.614、2.6732 m/km^2 和 67.2635(表 2),整体上呈现为离散、复杂的斑块类型。这主要是由于随着人口的不断增加,有限的耕地面积无法满足人类生产和生活的需求,大面积的禾草草原和草丛被开垦用作耕地所致。

在区域或全球尺度上划分植物功能型不能当作是某种具体的植物,而是一系列具有关键特征的植物组合。山西中部植物功能型表现出较高的多样性,并不能单纯的理解为该地区的植物种类或物种多样性高于其他地区,这主要是因为该地区较好的水热条件及其复杂多变的地理环境,在局部地区分布着具有不同关键特征的植物类群。

参考文献 (References):

- [1] Gallimore R G, Kutzbach J E. Role of orbitally induced changes in tundra area in the onset of glaciation. *Nature*, 1996, 381(6582): 503-505.
- [2] Foley J A, Samuel L, Prentice I C, Pollard D, Thompson S L. Coupling dynamic models of climate and vegetation. *Global Change Biology*, 1998, 4(5): 561-579.
- [3] 翁恩生,周广胜. 用于全球变化研究的中国植物功能型划分. *植物生态学报*, 2005, 29(1): 81-97.
- [4] Smith T M, Woodward F I, Shugart H H. *Plant Function Types*. Cambridge: Cambridge University Press, 1996.
- [5] Woodward F I, Cramer W. Plant functional types and climatic change: Introduction. *Journal of Vegetation Science*, 1996, 7(3): 306-308.
- [6] 孙国钧,张荣,周立. 植物功能多样性与功能群研究进展. *生态学报*, 2003, 23(7): 1430-1435.
- [7] 胡楠,范玉龙,丁圣彦,廖秉华. 陆地生态系统植物功能群研究进展. *生态学报*, 2008, 28(7): 3302-3311.
- [8] 唐海萍,蒋高明. 植物功能型及其生态学意义. *应用生态学报*, 2000, 11(3): 461-464.
- [9] Marcus Lindner, Petra Lasch, Wolfgang Cramer. Application of a forest succession model to a continentality gradient through Central Europe. *Climatic Change*, 1996, 34: 191-199.
- [10] Prentice I C, Cramer W, Harrison S P, Leemans R, Monserud R A, Solomon A M. A global biome model based on plant physiology and dominance, soil properties and climate. *Journal of Biogeography*, 1992, 19(2): 117-134.
- [11] Haxeltine A, Prentice I C. BIOME3: an equilibrium terrestrial biosphere model based on ecophysiological constraints, resource availability, and competition among plant functional types. *Global Biogeochemical Cycles*, 1996, 10(4): 693-709.
- [12] Yan X D, Zhao S D. Simulating sensitivities of Changbai Mountain forests to potential climate change. *Journal of Environmental Sciences*, 1996, 8(3): 354-366.
- [13] Smith T M. Examining the consequences of classifying species into functional types: a simulation model analysis // Smith T M, Shugart H H, Woodward F I. *Plant Functional Types: Their Relevance to Ecosystem Properties and Global Change*. Cambridge: Cambridge University Press, 1997: 271-288.

- [14] 李荣平, 刘志民, 蒋德明, 李雪华. 植物功能型及其研究方法. 生态学杂志, 2004, 23(1): 102-106.
- [15] Pausas J G. The effect of landscape pattern on mediterranean vegetation dynamics: A modelling approach using functional types. Journal of Vegetation Science, 2003, 14(3): 365-374.
- [16] Bradstock R A, Kenny B J. An application of plant functional types to fire management in a conservation reserve in southeastern Australia. Journal of Vegetation Science, 2003, 14(3): 345-354.
- [17] Aguiar M R, Paruelo J M, Sala O E, Lauenroth W K. Ecosystem responses to changes in plant functional type composition: an example from the Patagonian steppe. Journal of Vegetation Science, 1996, 7(3): 381-390.
- [18] Jobbágy E G, Paruelo J M, León R J C. Vegetation heterogeneity and diversity in flat and mountain landscapes of Patagonia-(Argentina). Journal of Vegetation Science, 1996, 7(4): 599-608.
- [19] Williams John W, Summers Robert L, Webb T. Applying plant functional types to construct biome maps from Eastern North American pollen data: comparisons with model results. Quaternary Science Reviews, 1998, 17(6/7): 607-627.
- [20] Hobbs R J. Can we use plant functional types to describe and predict responses to environmental change // Smith T M, Shugart H H, Woodward F I. Plant Functional Types: Their Relevance to Ecosystem Properties and Global Change. Cambridge: Cambridge University Press, 1997: 66-90.
- [21] Skarpe C. Plant functional types and climate in a southern African savanna. Journal of Vegetation Science, 1996, 7(3): 397-404.
- [22] Box E O. Plant functional types and climate at the global scale. Journal of Vegetation Science, 1996, 7(3): 309-320.
- [23] Han M, Yang L M, Zhang Y G, Zhou G S. The biomass of C3 and C4 plant function groups in *Leymus chinensis* communities and theirs response to environmental change along northeast China transect. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(6): 1825-1832.
- [24] Chapin F S, Bret-Harts M S, Hobbie S E, Zhong H L. Plant functional types as predictors of transient responses of arctic vegetation to global change. Journal of Vegetation Science, 1996, 7(3): 347-358.
- [25] 孙慧珍, 国庆喜, 周晓峰. 植物功能型分类标准及方法. 东北林业大学学报, 2004, 32(2): 81-83.
- [26] 倪健. 区域尺度的中国植物功能型与生物群区. 植物学报, 2001, 43(4): 419-425.
- [27] 马子清. 山西植被. 北京: 中国科学技术出版社, 2001.
- [28] 山西省计划委员会. 山西国土资源概论. 北京: 中国环境科学出版社, 1994.
- [29] 刘艳菊. 气候变化对山西省水资源的影响分析[D]. 南京: 河海大学, 2007.
- [30] Turner M G, Gardner R H. Quantitative Methods in Landscape Ecology. New York: Springer-Verlag, 1991.
- [31] 张金屯, 邱扬, 郑凤英. 景观格局的数量研究方法. 山地学报, 2000, 18(4): 346-352.
- [32] Wines J A. The Analysis of Landscape Patterns: Interdisciplinary Seminar in Ecology. Colorado: Colorado State University, 1988.
- [33] 肖笃宁. 景观生态学: 理论、方法及应用. 北京: 中国林业出版社, 1991.
- [34] Oneill R V, Krummel J R, Gardner R H, Sugihara G, Jackson B, Deangelis D L, Milne B T, Turner M G, Zygmunt B, Christensen S W, Dale V H, Graham R L. Indices of landscape pattern. Landscape Ecology, 1988, 1(3): 153-162.
- [35] 冯异星, 罗格平, 周德成, 韩其飞, 鲁蕾, 许文强, 朱磊, 尹昌应, 戴丽, 李艳忠. 近 50a 土地利用变化对干旱区典型流域景观格局的影响——以新疆玛纳斯河流域为例. 生态学报, 2010, 30(16): 4295-4305.
- [36] 姜永华, 江洪. 基于 RS 与 GIS 的森林景观空间异质性研究——以杭州市余杭区为例. 中国农学通报, 2008, 24(6): 139-145.
- [37] 郑新奇, 付梅臣, 姚慧, 胡业翠, 周伟. 景观格局空间分析技术及其应用. 北京: 科学出版社, 2010.