

中国白茅草丛植被地理分布及其斑块特征

李 湘

华北电力大学环境科学与工程学院, 北京

收稿日期: 2024年3月8日; 录用日期: 2024年4月9日; 发布日期: 2024年4月17日

摘 要

基于《中国植被图集(1:1,000,000)》, 应用ArcGIS软件, 提取白茅草丛数据用于空间配准并进行矢量和栅格化等处理, 计算得到各群系斑块特征并利用斑块形状指数方法对白茅草丛群系进行分析与评价。结果表明: 白茅草丛主要分布在云南, 少量分布在四川南部以及广西与云南边界。从空间格局上看, 白茅草丛植被小斑块多, 大斑块少, 斑块面积大小差别悬殊, 多数斑块分布较为集中。白茅草丛植被总面积为17267.27 km², 总斑块数为448个, 整体上各白茅群系的斑块形状均相对不规则且斑块异质性较大。基于总面积最大(16658.35 km², 占比96.5%)的白茅、密序野古草草丛斑块的情况, 根据其对作物的危害、入药和防风固堤等特性, 对白茅、密序野古草草丛斑块主要分布地区进行科学防治与利用提出了实用建议。

关键词

白茅, 斑块特征, 形状指数, 防治

Vegetation Geographic Distribution and Patch Characteristics of *Imperata cylindrica* in China

Xiang Li

College of Environmental Science and Engineering, North China Electric Power University, Beijing

Received: Mar. 8th, 2024; accepted: Apr. 9th, 2024; published: Apr. 17th, 2024

Abstract

Based on the Vegetation Atlas of China (1:1,000,000), ArcGIS software was used to extract the *Imperata cylindrica* data for spatial registration and vector and raster processing. The patch characteristics of each formation were calculated, analyzed and evaluated by patch shape index method. The results showed that the *Imperata cylindrica* was mainly distributed in Yunnan, and a small

文章引用: 李湘. 中国白茅草丛植被地理分布及其斑块特征[J]. 林业世界, 2024, 13(2): 150-157.

DOI: 10.12677/wjf.2024.132021

amount was distributed in southern Sichuan and the border between Guangxi and Yunnan. From the perspective of spatial pattern, there were more small patches and less big patches, and the difference of patch area was very large, and most patches were concentrated. The total vegetation area of the *Imperata cylindrica* is 17267.27 km², and the total patch number is 448. On the whole, the patch shape of each *Imperata cylindrica* formation is relatively irregular and the patch heterogeneity is large. Based on the largest total area (16658.35 km², accounting for 96.5%) of the *Imperata cylindrica* and dense order wild ancient grass patches, according to the harm to crops, medicine and wind protection and dyke reinforcement characteristics, the scientific control and utilization of the *Imperata cylindrica* and dense order wild ancient grass patches in the main distribution area were put forward.

Keywords

Imperata cylindrica, Patch Characteristics, Shape Index, Prevention and Cure

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

白茅(*Imperata cylindrica* L.)别名: 茅草、茅、茅根、甜根草、茅针、丝毛草等,白茅属于禾本科白茅属,是多年生适应性强的草本植物。白茅种类约 10 种,主要分布于热带和亚热带地区[1]。其广泛分布于亚洲、欧洲等的热带、亚热带、暖温带和温带地区,在我国分布范围广泛[2]。目前,白茅被认为是世界上危害极为严重的十大恶性杂草之一[3]。

白茅草丛可出现在河谷、草原、山地、丘陵及海滩等地带。白茅花絮带有白色柔毛,随风飞散萌发后可迅速形成优势种群,与周围植物竞争光照、水分、肥分等生存资源。白茅植被生命力极强,可生存于不同生境条件下,其生长密集,根系之间交错盘绕,且地下根系发达,其他植物很难侵占。白茅通过种子和根茎传播,给农作物造成严重的问题,使农作物很少生根发芽,造成减产[4] [5]。在白茅利用方面,白茅可作为防风固堤,防治水土流失的有效草本植物。同时,白茅可作为粗饲料,能够节省一部分精饲料,也可使牲畜的生长速度明显增加。此外,姜长阳等人测定和对比了黄穗茅和丝茅叶片中黄酮类化合物成分,发现白茅属植物具有民间药用功效[6] [7]。

植被的斑块特征是植物群落最重要的空间特征之一,斑块特征(数量、面积与周长)也是景观空间结构的一个主要参数,具有重要生态意义[8]。斑块大小易通过实测获取,其形状难以直接精确测量,因而多用斑块的各种指数来描述[9] [10]。斑块总面积和平均面积定义了景观的研究范围与尺度,有必要对各个白茅草丛植被种类的总面积和平均面积进行研究。更多的时候,斑块总面积往往作为计算其它景观格局指数的基础。斑块的边缘密度可表征景观中异质性斑块间物质、能量和物种的交换潜力及其相互影响强度,从而体现景观整体复杂性。边缘密度越大,说明边缘效应强度也越大,受人为影响越大,也反映出景观要素斑块分化程度与稳定性[11] [12]。同时斑块的形状、数目以及面积大小,对其生物多样性和各种生态学过程都有影响,斑块数越多、面积越大,斑块的物种多样性越丰富,生态系统越稳定,斑块数越少、面积越小,越易受到外部环境的影响。因此研究白茅草丛的地理分布特征与其斑块特征,并根据其特性,对白茅草丛进行科学防治与利用,提出合理建议有着重要意义。

本文通过《中国植被图集(1:1,000,000)》[13]中记录的白茅、扭黄茅、龙须草草丛(*Imperata cylindrica* var. major, *Heteropogon contortus*, *Eulaliopsisbinata* community)、白茅、密序野古草草丛(*Imperata cylindrica*

var, major, *Arundinella bengalensis* community)、白茅、密序野古草草丛 + 芒草、野古草、金茅草丛(*Imerata cylindrica* var, major, *Arundinella bengalensis* community + *Miscanthus sinensis*, *Arundinella hirta*, *Eularia speciosa* community)和白茅、密序野古草草丛 + 刺芒野古草、云南裂稈草草丛(*Imerata cylindrica* var, major, *Arundinella bengalensis* community + *Arundinella setosa*, *Schizachyrium delavayi* community) 4 种群系信息, 对它们的形状以及空间特征进行了分析, 既可为探讨白茅植被格局的动态变化规律奠定基础, 也可为其合理利用与科学防治提供依据。

2. 研究方法

2.1. 数据来源和处理方法

本文植被数据获取于科学出版社 2001 年出版的《中国植被图集(1:1,000,000)》[13], 应用 ArcGIS 软件提取白茅草丛植被数据, 进行空间配准、矢量数字化和数据栅格化等处理, 分析白茅植被的空间地理分布; 根据计算得到各群系斑块特征、形状指数对各群系进行分析和评价。本文研究内容如下:

1) 对白茅草丛的地理分布进行分析, 得到其空间分布图;

2) 进一步统计白茅草丛群系的斑块数、每个斑块的面积、周长以及各群系斑块的总面积、周长, 计算得到各白茅群系的斑块平均面积、最小斑块面积、最大斑块面积、斑块密度、边缘密度、面积极差、面积变异系数进行计算, 以及利用斑块形状指数方法(斑块圆环度指数计测公式、斑块扩展度指数计测公式和斑块方形指数计测公式), 对白茅草丛进行分析与评价, 得到我国白茅草丛植被的斑块特征;

3) 从占比最大的群系入手, 根据其对作物的危害、入药和防风固堤等特性, 对该群系主要分布地区进行科学防治与利用提出了实用建议。

2.2. 计算方法

2.2.1. 斑块特征计算方法

斑块平均面积计算公式如下:

$$S = A/n \quad (1)$$

式中: S ——植被斑块平均面积

A ——植被总面积

n ——植被斑块数

斑块平均面积反映了某一景观类型斑块面积的平均状况, 对景观的破碎化程度起到一定的描述作用, 其值越小, 景观越破碎。

斑块边缘密度计算公式如下:

$$ED = P/A \quad (2)$$

式中: ED ——植被斑块边缘密度

P ——植被斑块边缘长度

A ——植被总面积

斑块边缘密度越大, 说明边缘效应强度也越大, 受人为影响越大, 也反映出景观要素斑块分化程度与稳定性。

斑块密度计算公式如下:

$$PD = n/A \quad (3)$$

式中: PD ——斑块密度

n ——植被斑块数

A ——植被总面积

斑块密度从另一个角度反映了景观要素的破碎化程度，斑块密度越大，破碎化程度越高。

斑块面积极差计算公式如下：

$$RA = X_{\max} - X_{\min} \quad (4)$$

式中： X_{\max} ——斑块面积最大值

X_{\min} ——斑块面积最小值

斑块面积极差能够反映斑块大小差异情况，面积极差越大，斑块大小差异越大。

变异系数计算公式如下：

$$CV = \frac{SD}{S} \times 100\% \quad (5)$$

式中： SD ——斑块面积标准差

S ——植被斑块平均面积

斑块的变异系数又称景观离散指数，可以衡量景观离散化程度。斑块的变异系数越大，景观离散程度越大。

2.2.2. 斑块形状指数计算方法

斑块圆环度指数公式如下：

$$C_i = P_i / A_i \quad (6)$$

式中： C_i ——第 i 类斑块的斑块圆环度指数

A_i ——第 i 类斑块的面积

P_i ——第 i 类斑块中第 i 个斑块的周长

斑块扩展度指数公式如下：

$$D_i = \frac{P_i}{2\sqrt{\pi A_i}} \quad (7)$$

式中： D_i ——第 i 类斑块的斑块圆环度指数

式中 A_i 、 P_i 字母含义同上

斑块方形指数公式如下：

$$S_i = \frac{0.25P_i}{\sqrt{A_i}} \quad (8)$$

式中： S_i ——第 i 类斑块的斑块方形指数

式中 A_i 、 P_i 字母含义同上

3. 结果与分析

3.1. 白茅草丛植被的空间分布

如图 1 所示，由白茅所占的优势种草丛，在我国主要分布于云南，少量分布在四川南部以及广西与云南边界。依据张新时的《中国植被图集(1:1,000,000)》中所用的植被区划标准，可以得到白茅、扭黄茅、龙须草草丛主要分布在滇中南山地峡谷区和滇西南河谷山地区；白茅、密序野古草草丛主要分布在滇西南河谷山地区、滇中南山地峡谷区、西双版纳山地、盆地区、滇桂石灰岩丘陵区、滇东南峡谷山地区和

川滇金沙江峡谷区；白茅、密序野古草丛 + 芒草、野古草、金茅草丛主要分布在滇东南峡谷山地区；白茅、密序野古草丛 + 刺芒野古草、云南裂稈草丛主要分布在滇中南山地峡谷区。

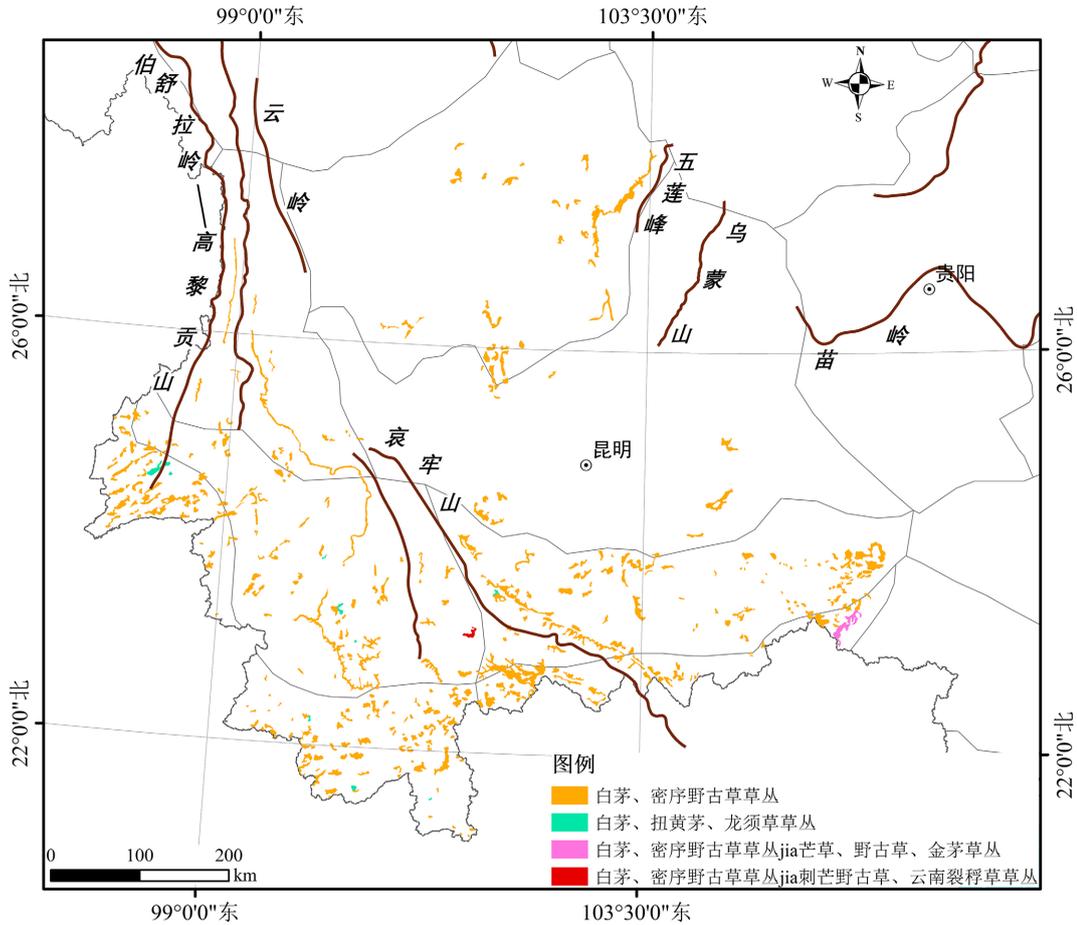


Figure 1. Vegetation geographic distribution map of *Imperata cylindrica*
图 1. 白茅草从植被地理分布图

3.2. 白茅草从的斑块特征

对我国白茅植被的斑块特征进行计算分析，结果见表 1。

Table 1. Vegetation patch characteristics of *Imperata cylindrica*
表 1. 白茅草从植被斑块特征

类型	斑块数	占比(%)	总面积 (km ²)	占比(%)	平均面积 (km ²)	最小面积 (km ²)	最大面积 (km ²)	斑块密度 (个/hm ²)	边缘密度 (m/hm ²)	面积极差 (km ²)	面积标准差	变异系数 (%)
白茅、扭黄茅、龙须草丛	9	2.00%	262.52	1.50%	29.17	6.21	41.58	3.42E-04	9.15	35.37	37.29	127.80
白茅、密序野古草丛	436	97.30%	16658.35	96.50%	38.20	2.54	838.03	2.62E-04	9.33	835.49	51.55	134.93
白茅、密序野古草丛 + 芒草、野古草、金茅草丛	2	0.40%	271.41	1.60%	135.71	85.31	186.10	7.37E-05	7.59	100.79	71.27	52.52
白茅、密序野古草丛 + 刺芒野古草、云南裂稈草丛	1	0.20%	75.39	0.40%	75.39	75.39	75.39	1.33E-04	7.49	0	0	0
总计	448	100	17267.67	100	278.471	169.45	1141.1	8.11E-04	33.56	/	/	/

白茅草丛植被总面积为 17267.27 km²，各植被类型斑块面积分布极其不均衡，其中白茅、密序野古草草丛总面积占比最大达到 96.50%。在相对意义上说明了白茅、密序野古草草丛群系对整个白茅植被的贡献率最大。斑块面积及极差和斑块面积标准差能表示斑块大小的离散情况，白茅、密序野古草草丛从斑块极差相对于均值较大、斑块标准差也比均值大，白茅草丛植被斑块最大面积(838.03 km²)出现在白茅、密序野古草草丛，斑块最小面积(2.54 km²)也出现在白茅、密序野古草草丛，以上均这说明说明该群系斑块大小差别悬殊，一般认为在同一景观级别上具有较小平均面积值的景观比具有较大平均面积值的景观更破碎。从表中可以得到，白茅、扭黄茅、龙须草草丛从斑块得平均面积最小，为 29.17 km²，白茅、密序野古草草丛次之。它们的斑块破碎化较高，说明人类经营活动的干扰是导致白茅斑块破碎的主导因素之一。而白茅、密序野古草草丛 + 芒草、野古草、金茅草从平均面积最大(135.71 km²)，斑块完整性较高，受干扰程度低。

白茅植被共有 448 个斑块，板块个数分布也不均衡。其中斑块密度最大(2.62E-04 个/hm²)的是白茅、扭黄茅、龙须草草丛，其次为白茅、密序野古草草丛，最低的(7.37E-05 个/hm²)是白茅、密序野古草草丛 + 芒草、野古草、金茅草丛。说明白茅、扭黄茅、龙须草草丛和白茅、密序野古草草丛从破碎化程度高，而白茅、密序野古草草丛 + 芒草、野古草、金茅草丛斑块破碎化程度最低，斑块连通性好，进一步验证了前文论断。

越紧密的边缘形状，即边缘密度越小，不易被外部环境影响，更有利于保存能量、养分和生物[14]。从表 1 可以看出，白茅植被各类型边缘密度总体上均不高。其中白茅、密序野古草草丛的边缘密度最高，为 9.33 m/hm²，表明斑块破碎化程度越高，受自然或人为影响最大。其次为白茅、扭黄茅、龙须草草丛，其边缘密度为 9.15 m/hm²，最后为白茅、密序野古草草丛 + 芒草、野古草、金茅草丛和白茅、密序野古草草丛 + 刺芒野古草、云南裂稈草丛，其边缘密度分别为 7.59 m/hm² 和 7.49 m/hm²，无显著差异，斑块破碎化程度较低，完整性较好。白茅、密序野古草草丛 + 刺芒野古草、云南裂稈草丛由于其斑块数量和斑块面积均相对较小，其边缘密度也较小，两者具正向相关效应。白茅、密序野古草草丛 + 芒草、野古草、金茅草丛的面积与白茅、扭黄茅、龙须草草丛相差无几，而斑块数量少于白茅、扭黄茅、龙须草草丛，边缘密度也较白茅、扭黄茅、龙须草草丛小，说明白茅、密序野古草草丛 + 芒草、野古草、金茅草丛斑块保存完好，多以大面积斑块存在，斑块稳定性、连通性较好。而白茅、扭黄茅、龙须草草丛受人为活动干扰强烈。

斑块的变异系数又称景观离散指数，可以衡量景观离散化程度，从表 1 可以看出白茅、扭黄茅、龙须草草丛和白茅、密序野古草草丛斑块变异系数较大，为 127.80% 和 134.93%。表明两者斑块离散的程度较大。白茅、密序野古草草丛 + 芒草、野古草、金茅草丛的变异系数为 52.52%，斑块离散程度小。

3.3. 白茅草丛的斑块形状指数分析

Table 2. The average value of vegetation patch shape index of *Imperata cylindrica*
表 2. 白茅草丛植被斑块形状指数的平均值

类型	C	D	S
白茅、扭黄茅、龙须草草丛	1.20	1.44	1.28
白茅、密序野古草草丛	1.16	1.63	1.44
白茅、密序野古草草丛 + 芒草、野古草、金茅草丛	0.75	2.43	2.16
白茅、密序野古草草丛 + 刺芒野古草、云南裂稈草丛	0.75	1.83	1.63

斑块圆环度指数(C)表征斑块的边界效应，斑块面积越大，单位面积中的边界数量越少，斑块形状越

不紧凑。斑块扩展度指数(D)代表斑块形状与圆形相差的程度。D 最小值为 1, 越接近 1, 表示斑块形状与圆形越接近; 值越大, 则斑块形状越偏离于圆形, 形状越不规则。斑块方形指数(S)代表斑块形状与正方形相差的程度。S 值为 1, 值越大, 表示斑块形状偏离于正方形, 形状越长[15]。

对各白茅草丛类型的每个斑块通过圆环度、扩展度和斑块方形指数计算各形状指数, 取各个类型所有斑块的指数的平均值, 结果见表 2。表 2 中可以看出, 白茅、扭黄茅、龙须草草丛和白茅、密序野古草草丛的 C 值不相上下, 都比较大, 表明两者单位面积的边界相对最多, 其与外界物质和能量交换相对活跃; 而白茅、密序野古草草丛 + 芒草、野古草、金茅草丛和白茅、密序野古草草丛 + 刺芒野古草、云南裂稈草草丛 C 值最小, 表明其单位面积的边界相对最少, 较为稳定。白茅、密序野古草草丛 + 芒草、野古草、金茅草丛的 D 值和 S 值最大, 说明其斑块形状偏离于圆形和正方形, 相较于其他群系斑块为不规则形状。整体上看这几种群系的斑块形状均相对不规则。从整体白茅草丛斑块形状指数 D 值和 S 值分析, 不同白茅草丛景观类型之间形状指数相差大, 形状指数 C 值仅白茅、密序野古草草丛 + 芒草、野古草、金茅草丛和白茅、密序野古草草丛 + 刺芒野古草、云南裂稈草草丛无差异, 表明白茅草丛景观异质性较大。

4. 总结与讨论

4.1. 总结

由空间分布、斑块特征及形状指数分析得出我国白茅草丛植被的斑块特征: 小斑块多, 大斑块少, 斑块面积大小差别悬殊, 多数斑块间分布较为集中。白茅草丛植被总面积为 17267.27 km², 总斑块数为 448 个, 各植被类型斑块面积分布极其不均衡。整体上各白茅群系的斑块形状均相对不规则。不同白茅草丛景观类型之间形状指数 D 值和 S 值有显著差异, 表明白茅草丛斑块异质性较大。

4.2. 讨论

相较于其他三种类型斑块, 白茅、密序野古草草丛斑块总面积为 16658.35 km² (占比 96.5%), 斑块数为 436 个(占比 97.3%), 离散程度大, 总体物种多样性丰富及生态系统较稳定。根据图 1 可知, 白茅、密序野古草草丛斑块主要分布在滇西南河谷山地区、滇中南山地峡谷区、西双版纳山地、盆地区、滇桂石灰岩丘陵区、滇东南峡谷山地区和川滇金沙江峡谷区, 因此, 根据其对农作物的危害性、入药和防风固堤等特性, 十分有必要对白茅、密序野古草草丛斑块主要分布地区进行科学防治与利用。

在防治方面: 利用物理与化学方法治理白茅往往难以根除, 赵远[16]等人以西藏青稞藏青 2000 和小麦品种高原 437 为研究对象, 研究了不同种植密度对西藏恶性杂草白茅的抑制作用。结果表明供试的青稞和小麦品种对恶性杂草白茅种群数量有显著抑制作用, 随着小麦种植密度增大, 白茅种群数量差异显著, 当小麦种植密度达到 15 kg/667m²时, 抑制白茅的作用最佳。在青稞与小麦种植密度相同时, 对白茅种群数量和干重的抑制差异极显著, 小麦的抑草效果更佳。因此, 考虑到云南、四川等地区主要以小麦种植为主, 因此在该地区种植小麦品种高原 437 可以显著抑制恶性杂草白茅种群数量, 从而有效防治恶性杂草白茅对其他作物的侵害。

在药用方面: 魏菱鸽[17]等人研究以高温高压超声辅助法提取白茅根多糖, 通过响应面法优化白茅根多糖提取工艺, 其中, RPS-DS0.1 能显著提高 IR-HepG2 细胞中葡萄糖消耗量、糖原含量、己糖激酶和丙酮酸激酶活性, 调节糖代谢, 从而达到降糖作用。因此, 有效利用云南四川白茅密集分布地区为白茅根以及多糖的开发和应用提供样本, 同时有效防治白茅对作物的侵害及生物多样性的减少。

此外, 在防治土壤流失和生态修复方面: 文卓立[18]以重庆缙云山不同次生演替阶段的 10 个植物群落为研究对象, 采用原状土冲刷试验及室内土壤理化性质分析等方法, 发现白茅植物群落处于次生演替

的最早阶段,但是其群落稳定性较高,土壤抗冲性高,因此,在滇西南河谷山和川滇金沙江峡谷区等河岸地区的次生演替阶段接种白茅、密序野古草有利于提高其生态稳定性,从而在防风固堤,防治水土流失得到有效利用。同时分布在重金属污染工业区和矿区的密集且稳定性强的白茅、密序野古草从斑块处,对重金属胁迫下接种不同丛枝菌根真菌(arbuscular mycorrhizal fungi, AMF)能够促进植物的生长、提高植物光合作用[19],对重金属污染土壤具有一定的生态修复潜力,从而提高矿区生态修复效率。

综上,根据白茅草从植物斑块群落分布特征从而因地制宜,采取合适的科学方法来有效防治与利用白茅草从植物具有实用且重要的意义。

参考文献

- [1] 陈守良. 中国植物志[M]. 第10卷2(禾本科5). 北京: 科学出版社, 1997.
- [2] 徐立荣. 草坪杂草——白茅防治技术[J]. 南方农业(园林花卉版), 2008(5): 76-78.
- [3] Xuan, T.D., Toyama, T., Fukuta, M.J., et al. (2009) Chemical Interaction in the Invasiveness of Cogongrass (*Imperata cylindrica* (L.) Beauv.). *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, **57**, 9448-9453. <https://doi.org/10.1021/jf902310j>
- [4] 张新时. 中国植被及其地理格局: 中华人民共和国植被图(1:100 000)说明书[M]. 北京: 地质出版社, 2007.
- [5] Udensi, U.E., Akobundu, I.O., Ayeni, A.O., et al. (1999) Management of Cogongrass (*Imperata cylindrica*) with Velvetbean (*Mucuna pruriens* var. *Utilis*) and Herbicides. *Weed Technology*, **13**, 201-208. <https://doi.org/10.1017/S0890037X00041610>
- [6] 冷琴, 杨雅玲. 国产白茅属 *Imperata cylindrica* (禾本科)部分生物学特性的研究[J]. 南京大学学报(自然科学版), 2002(5): 703-715.
- [7] 姜长阳, 宁淑香. 白茅的组织培养及植株再生[J]. 植物生理学通讯, 2001(2): 132-133.
- [8] 肖笃宁, 李秀珍, 高峻. 景观生态学[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [9] 刘灿然, 陈灵芝. 北京地区植被景观中斑块形状的数量分析[J]. 生态学报, 2000(4): 559-567.
- [10] 张金屯, 邱扬, 郑凤英. 景观格局的数量研究方法[J]. 山地学报, 2000(4): 346-352.
- [11] 何东进, 洪伟, 胡海清, 等. 武夷山风景名胜区景观要素斑块特征分析[J]. 应用与环境生物学报, 2003(6): 574-577.
- [12] 邬建国. 景观生态学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002.
- [13] 中国科学院中国植被图编辑委员会. 中国植被图集[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [14] 邬建国. 景观生态学: 格局, 过程, 尺度与等级[M]. 北京: 高等教育出版社, 2007.
- [15] 李斌, 张金屯. 黄土高原灌丛景观斑块形状的数量和分形分析[J]. 中国农学通报, 2009, 25(22): 296-300.
- [16] 赵远, 陈新兰, 央金, 等. 西藏麦类作物对恶性杂草白茅抑制作用分析[J]. 植物保护, 2023, 49(6): 299-302.
- [17] 魏菱鸽, 李慧, 米圣成, 等. 白茅根多糖理化性质及对HepG2细胞的降糖作用研究[J/OL]. 食品与发酵工业, 1-16. <https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.037115>, 2024-03-01.
- [18] 文卓立. 缙云山次生演替植物群落土壤抗冲性研究[D]: [博士学位论文]. 重庆: 西南大学, 2008.
- [19] 梁晓霞, 梁雪丽, 廖敏伊, 等. 铜污染下丛枝菌根真菌对白茅生长及土壤酶活性的影响[J]. 山西大学学报(自然科学版), 2023, 46(4): 951-960.