

山西亚高山草地物种多样性与生物量 空间变化数据集

徐满厚^{1,2*}, 赵梓彤¹

1. 太原师范学院地理科学学院, 晋中 030619; 2. 太原师范学院碳中和研究院, 晋中 030619

摘要: 亚高山草地为野生动物和食草动物提供牧草, 保护它们的完整性具有重要意义。作者于 2016 年 7-8 月, 在黄土高原东部地区选择具有亚高山草地带的高海拔山地作为实验样地, 从北向南一共选择了 9 个山地。在每个山地选择一块典型亚高山草地进行植物群落物种多样性和生物量调查, 同时记录下亚高山草地的地理坐标。在样地中随机设置 6 个 1 m² 样方, 用样方框调查每一个植物种的高度、多度、盖度、频度, 计算群落 α 多样性指数; 再以 0.5°、0.45° 为间隔分别将纬度、经度划分为 5 个梯度带, 以 100 m 为间隔将海拔划分为 6 个梯度带, 计算群落 β 、 γ 多样性指数。最后, 从 6 个物种多样性调查样方中, 随机挑选 5 个作为植物生物量调查样方, 在中间位置设置 0.2 m × 0.2 m 的小样方, 采用齐地刈割法获取地上生物量, 采用挖掘法获取地下生物量。该数据集包括: (1) 山地名称及样地地理位置; (2) 山西亚高山草地 α 多样性指数; (3) 山西亚高山草地地理梯度带划分及其 β 多样性指数; (4) 山西亚高山草地 γ 多样性指数; (5) 山西亚高山草地生物量指标; (6) 山西亚高山草地 α 多样性与生物量关系的数据。数据格式为.shp 和.xlsx, 数据量为 41.2 KB (压缩为 1 个文件 33.6 KB)。

关键词: 亚高山草地; 物种多样性; 生物量; 地理梯度

DOI: <https://doi.org/10.3974/geodp.2022.04.03>

CSTR: <https://cstr.escience.org.cn/CSTR:20146.14.2022.04.03>

数据可用性声明:

本文关联实体数据集已在《全球变化数据仓储电子杂志(中英文)》出版, 可获取:

<https://doi.org/10.3974/geodb.2022.05.03.V1> 或 <https://cstr.escience.org.cn/CSTR:20146.11.2022.05.03.V1>.

1 前言

植被是陆地生态系统的重要组成部分, 具有调节气候、更新土壤肥力、保护生物多样性、提高生产力等生态服务功能^[1,2]。作为植被的两大基本特征, 物种多样性和生物量沿地理梯度的空间分布是生态学和地理学研究的热点问题和重要内容。物种多样性变化反映了群落中物种丰富度、均匀度的变化, 以及不同自然地理条件与群落的相互关系, 因此物种

收稿日期: 2022-05-20; 修订日期: 2022-08-09; 出版日期: 2022-12-24

基金项目: 山西省科技厅(202103021224301); 山西省教育厅(2021L431); 太原师范学院(CXCY2203)

*通讯作者: 徐满厚 F-8170-2017, 太原师范学院, xumh@tynu.edu.cn

数据引用方式: [1] 徐满厚, 赵梓彤. 山西亚高山草地物种多样性与生物量空间变化数据集[J]. 全球变化数据学报, 2022, 6(4): 521-532. <https://doi.org/10.3974/geodp.2022.04.03>. <https://cstr.escience.org.cn/CSTR:20146.14.2022.04.03>.

[2] 徐满厚, 赵梓彤. 山西亚高山草地物种多样性与生物量调查数据集[J/DB/OL]. 全球变化数据仓储电子杂志, 2022. <https://doi.org/10.3974/geodb.2022.05.03.V1>. <https://cstr.escience.org.cn/CSTR:20146.11.2022.05.03.V1>.

多样性测度及其沿地理梯度的变化规律成为生物多样性研究的重要议题^[3]。物种多样性测度主要从三个空间尺度着手^[4]：(1) 生境内多样性，即 α 多样性，主要关注局域均质生境下的物种数目；(2) 生境间多样性，即 β 多样性，指沿环境梯度不同生境群落之间物种组成的相异性或物种沿环境梯度的更替速率；(3) 区域多样性，即 γ 多样性，描述区域或大陆尺度的物种数量。与物种多样性类似，生物量也是生态系统的基本数量特征，用于反映植被生产力，是研究生态系统功能的基础^[5]。生物量在各器官间的分配反映了植物适应环境的生长策略，对个体生长、物种共存、植被恢复具有重要作用^[6]。生物量在叶、茎、根中的分配策略以及器官间的异速生长关系，是生态系统物种进化、多样性维持和碳循环的基础，也是理解生态系统碳分配和碳汇功能的关键^[7]。因此，生物量分配，特别是在不同地理梯度影响下的分配模式，成为生物量研究的热点内容。

亚高山草地主要分布在高海拔山地，其物种多样性和生物量受山地地形影响较为显著。经纬度和海拔是山地亚高山草地主要的地形因素，直接影响太阳辐射和降水的空间再分配，进而导致土壤水分和温度的差异性分布^[8-9]。黄土高原东部分布的亚高山草地面积大，物种组成丰富，不仅是优良的自然牧场，也是著名的生态旅游景点，如被誉为“高原翡翠”的荷叶坪、“华北九寨沟”的舜王坪、“华北屋脊”的五台山等^[10-12]。近些年来，随着旅游业和放牧业的高度发展，六棱山、五台山、吕梁山、中条山等山系分布的亚高山草地受人类破坏逐渐增强，生态环境敏感脆弱，草地退化日益严重，物种多样性受到严重威胁^[13,14]。因此，本研究选择黄土高原东部的 9 个典型亚高山草地作为实验样地，从群落水平上探究自然条件下物种多样性和生物量的空间变化，获得了以下三大类数据：(1) 不同山地亚高山草地物种多样性 (α 、 β 、 γ) 的数据；(2) 不同山地亚高山草地生物量的数据；(3) 不同山地亚高山草地物种多样性与生物量关系的数据。

2 数据集元数据简介

《山地亚高山草地物种多样性与生物量调查数据集》^[15]的名称、作者、地理区域、数据年代、数据集组成、数据出版与共享服务平台、数据共享政策等信息见附表 1。

3 数据研发方法

3.1 样地设置

借助黄土高原植被覆盖度图 (图 1a) 和山西地形图 (图 1b)，确定黄土高原东部亚高山草地的分布区域。于 2016 年 7-8 月进行实验样地的选取与踏查工作，选择人为干扰少、地势平坦、植被分布均匀的典型亚高山草地作为实验样地^[4]。在整个东部地区，从北向南依次调查了 9 个亚高山草地类型，分别位于六棱山系的甸顶山，五台山系的北台、东台，吕梁山系的马仑草原、荷叶坪、云中山、云顶山，中条山系的舜王坪、圣王坪 (图 1b)。

3.2 群落物种多样性调查

每块样地随机设置 6 个面积为 1 m^2 的样方进行群落多样性调查，共设置 54 个样方^[4]。采用的调查工具为 $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ 的样方框，并将其平分为 100 个 $0.1 \text{ m} \times 0.1 \text{ m}$ 的网格 (图 2)；

表 1 《山西亚高山草地物种多样性与生物量调查数据集》元数据简表

条 目	调 查
数据集名称	山西亚高山草地物种多样性与生物量空间变化数据集
数据集短名	BiomassSubalpineMeadowsShanxi
作者信息	徐满厚 F-8170-2017, 太原师范学院, xumh@tynu.edu.cn 赵梓彤, 太原师范学院, zhaozit610@163.com
地理区域	山西省 (110°14'E-114°33'E, 34°34'N-40°43'N) 的甸顶山、五台山北台、五台山东台、马占草原、荷叶坪、云中山、云顶山、舜王坪、圣王坪等 9 个山地
数据年代	2016 年
数据格式	.shp、.xlsx
数据量	41.2 KB (压缩为 1 个文件 33.6 KB)
数据集组成	(1) 山地名称及样地地理位置; (2) 山西亚高山草地 α 多样性指数; (3) 山西亚高山草地地理梯度带划分及其 β 多样性指数; (4) 山西亚高山草地 γ 多样性指数; (5) 山西亚高山草地生物量指标; (6) 山西亚高山草地 α 多样性与生物量关系的数据
基金项目	山西省科技厅 (202103021224301); 山西省教育局 (2021L431); 太原师范学院 (CXCY2203)
数据计算环境	Microsoft Excel in Windows
出版与共享服务平台	全球变化科学研究数据出版系统 http://www.geodoi.ac.cn
地址	北京市朝阳区大屯路甲 11 号 100101, 中国科学院地理科学与资源研究所
数据共享政策	全球变化科学研究数据出版系统的“数据”包括元数据 (中英文)、通过《全球变化数据仓储电子杂志 (中英文)》发表的实体数据集和通过《全球变化数据学报 (中英文)》发表的数据论文。其共享政策如下: (1) “数据”以最便利的方式通过互联网系统免费向全社会开放, 用户免费浏览、免费下载; (2) 最终用户使用“数据”需要按照引用格式在参考文献或适当的位置标注数据来源; (3) 增值服务用户或以任何形式散发和传播 (包括通过计算机服务器) “数据”的用户需要与《全球变化数据学报 (中英文)》编辑部签署书面协议, 获得许可; (4) 摘取“数据”中的部分记录创作新数据的作者需要遵循 10% 引用原则, 即从本数据集中摘取的数据记录少于新数据集总记录量的 10%, 同时需要对摘取的数据记录标注数据来源 ^[16]
数据和论文检索系统	DOI, CSTR, Crossref, DCI, CSCD, CNKI, SciEngine, WDS/ISC, GEOSS

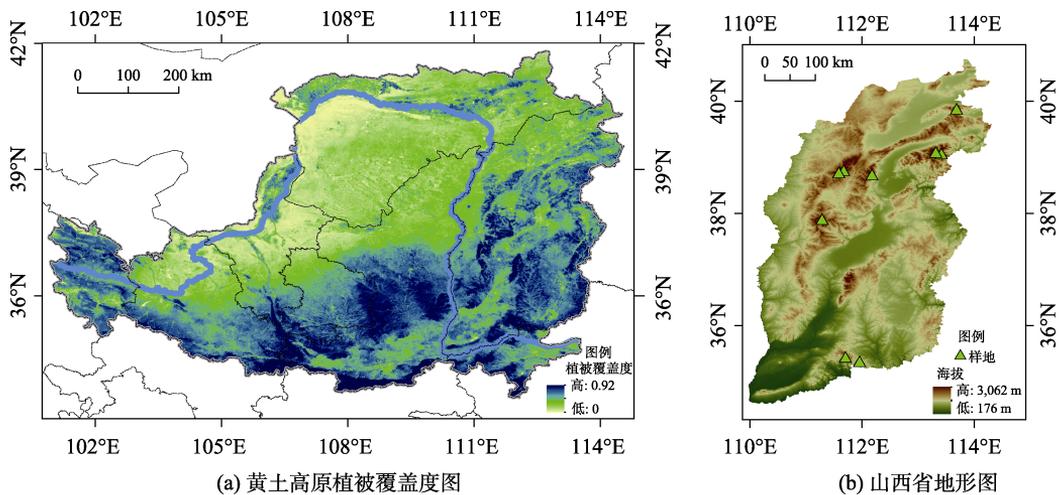


图 1 研究区与实验样地分布图

(注: 图 1a 选择黄土高原东部植被覆盖度大的地区作为研究区; 图 1b 选择山西省北部到南部共 9 个高海拔山地作为实验样地)

记录样方中每个植物种的高度、多度、盖度、频度，计算物种多样性指数。同时，用 GPS 记录每块样地的纬度、经度、海拔等地理位置信息（表 2）。

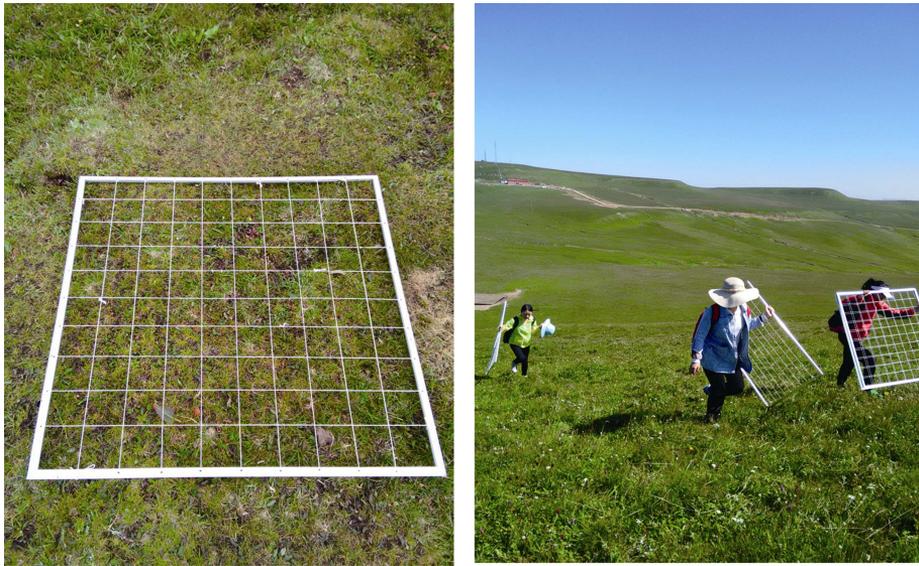


图 2 采用样方框进行植物群落物种多样性调查

表 2 山地名称及样地地理位置

序号	山地中文名	山地英文名	山地名缩写	样地地理位置		
				纬度/°	经度/°	海拔/m
1	甸顶山	Dianding	DD	39.849	113.939	2,265
2	五台山东台	Dongtai	DT	39.052	113.669	2,565
3	五台山北台	Beitai	BT	39.077	113.570	3,045
4	云中山	Yunzhong	YZ	38.677	112.432	2,260
5	马仑草原	Malun	ML	38.752	111.928	2,710
6	荷叶坪	Heyeping	HY	38.714	111.841	2,745
7	云顶山	Yunding	YD	37.882	111.541	2,690
8	舜王坪	Shunwangping	SU	35.423	111.959	2,250
9	圣王坪	Shengwangping	SE	35.344	112.212	1,720

3.3 群落生物量调查

随机选取 5 个物种多样性调查样方，在中间位置设置大小为 0.2 m×0.2 m 的小样方（共 45 个），采用齐地刈割法获取植物地上部分（图 3）；之后，采用挖土块法获取整个 0.2 m×0.2 m 面积内的植物地下根系，挖取深度为 0.2 m（图 4）。将获取的植物地上部分和体积为 0.2 m×0.2 m×0.2 m 的土块，密封带回实验室进行后期处理。地上部分样品处理仅保留当年植物活体；地下根系样品处理首先用 40 目标准土壤筛去除土壤中的石块等粗质杂物，再用 80 目标准土壤筛筛分出直径≥0.18 mm 的细根^[4]。将处理后的地上枝叶和地下活根样品放进 80 °C 烘箱中烘干至恒重，用电子天平称重获得植物地上、地下生物量。



图3 采用齐地刈割法获取植物地上部分照片



图4 采用挖土块法获取植物地下根系照片

3.4 数据处理

(1) 植物群落 α 、 β 、 γ 多样性的计算

首先，采用相对高度、相对多度、相对盖度、相对频度4个指标，计算得到 Patrick 指数、Simpson 指数、Shannon 指数、Pielou 指数等 α 多样性指数^[13]。然后，纬向上以 0.5° 为间隔，经向上以 0.45° 为间隔，海拔上以 100 m 为间隔，将 9 个实验样地划分成 5 个经纬度梯度带和 6 个海拔梯度带^[4]。与 α 多样性不同的是， β 多样性测度可分成二元属性数据测度方法和数量数据测度方法两种，因此采用基于二元属性数据的 Cody 指数和 Sorenson 相异性指数，以及基于数量数据的 Bray-Curtis 指数^[4]。最后，以每个地理梯度带（5 个纬度梯度带、5 个经度梯度带、6 个海拔梯度带）中的总物种数作为 γ 多样性指标^[4]。

(2) 植物群落生物量的计算

以地上生物量、地下生物量、总生物量和根冠比作为生物量指标^[17,18]。

4 数据结果与验证

4.1 数据集组成

本数据集共包括六类数据，以表的形式命名，分别为：（1）山地名称及样地地理位置，

主要包括山地中文名、山地英文名、山地名缩写、纬度、经度、海拔等数据,数据格式为.shp、.xlsx;(2)山西亚高山草地 α 多样性指数,主要包括 Patrick 指数、Simpson 指数、Shannon 指数、Pielou 指数等数据,数据格式为.xlsx;(3)山西亚高山草地地理梯度带划分及其 β 多样性指数,主要包括地理梯度范围、Cody 指数、Sørensen 指数、Bray-Curtis 指数等数据,数据格式为.xlsx;(4)山西亚高山草地 γ 多样性指数,主要包括地理梯度范围、Richness 指数等数据,数据格式为.xlsx;(5)山西亚高山草地生物量指标,主要包括地上生物量、地下生物量、总生物量、根冠比等数据,数据格式为.xlsx;(6)山西亚高山草地 α 多样性与生物量关系的数据,主要包括 Patrick 指数、Simpson 指数、Shannon 指数、Pielou 指数、地上生物量、地下生物量、总生物量、根冠比等数据,数据格式为.xlsx。样地调查的.xlsx数据汇总在一个 Excel 文件中,命名为“Diversity&BiomassSub-alpineMeadowsShanxi”;样地位置的.shp数据汇总在一个文件夹中,命名为“SampleSites”。

4.2 数据结果

在每一个山地,设置的植物群落物种多样性调查样方数为6个,通过调查植物的生长指标,计算得到4个 α 多样性指数,分别为 Patrick 指数、Simpson 指数、Shannon 指数、Pielou 指数(表3);再根据表2中对不同山地地理梯度带的划分,计算得到3个 β 多样性指数,分别为 Cody 指数、Sørensen 指数、Bray-Curtis 指数(表4);同样,计算得到1个 γ 多样性指数,即 Richness 指数(表5)。

表3 山西亚高山草地 α 多样性指数统计表

山地	样方	Patrick 指数	Simpson 指数	Shannon 指数	Pielou 指数
马仑草原	1	11	0.790	1.906	0.795
	2	10	0.833	1.961	0.852
	3	11	0.787	1.933	0.806
	4	11	0.825	1.988	0.829
	5	10	0.800	1.866	0.810
	6	11	0.812	1.942	0.810
荷叶坪	1	12	0.871	2.208	0.888
	2	14	0.899	2.459	0.932
	3	11	0.851	2.097	0.874
	4	16	0.867	2.319	0.836
	5	14	0.891	2.389	0.905
	6	18	0.901	2.540	0.879
云中山	1	23	0.920	2.787	0.889
	2	22	0.936	2.899	0.938
	3	26	0.939	3.023	0.928
	4	23	0.905	2.711	0.865
	5	35	0.901	2.827	0.795
	6	29	0.921	2.902	0.862

续表 3

山地	样方	Patrick 指数	Simpson 指数	Shannon 指数	Pielou 指数
云顶山	1	16	0.890	2.431	0.877
	2	18	0.900	2.507	0.867
	3	18	0.894	2.505	0.867
	4	19	0.872	2.392	0.812
	5	19	0.882	2.529	0.859
	6	17	0.888	2.474	0.873
甸顶山	1	23	0.888	2.596	0.828
	2	21	0.927	2.761	0.907
	3	23	0.924	2.817	0.899
	4	21	0.894	2.667	0.876
	5	19	0.904	2.609	0.886
	6	25	0.861	2.619	0.813
五台山东台	1	24	0.925	2.863	0.901
	2	25	0.929	2.878	0.894
	3	24	0.892	2.709	0.853
	4	30	0.905	2.840	0.835
	5	22	0.925	2.797	0.905
	6	25	0.896	2.768	0.860
五台山北台	1	13	0.842	2.135	0.833
	2	12	0.859	2.194	0.883
	3	19	0.884	2.574	0.874
	4	18	0.874	2.375	0.822
	5	15	0.850	2.268	0.837
	6	18	0.870	2.400	0.830
舜王坪	1	19	0.881	2.439	0.828
	2	22	0.868	2.430	0.786
	3	20	0.916	2.709	0.904
	4	21	0.843	2.421	0.795
	5	18	0.864	2.334	0.808
	6	22	0.898	2.664	0.862
圣王坪	1	19	0.857	2.384	0.810
	2	21	0.901	2.641	0.868
	3	18	0.875	2.451	0.848
	4	22	0.907	2.729	0.883
	5	15	0.905	2.486	0.918
	6	24	0.878	2.609	0.821

表4 山西亚高山草地地理梯度带划分及其 β 多样性指数统计表

地理梯度带	带号	Cody 指数	Sørensen 指数	Bray-Curtis 指数
纬度/ $^{\circ}$	1—2	26	0.553	0.395
	2—3	18.5	0.407	1.295
	3—4	15.5	0.295	1.38
	4—5	14	0.318	1.061
	1—2	26	0.553	0.395
经度/ $^{\circ}$	1—3	23.5	0.409	0.551
	1—4	23	0.426	0.526
	1—5	19	0.388	0.587
	1—2	18	0.429	1.15
	2—3	19	0.317	0.803
	3—4	22	0.367	0.732
	4—5	13	0.295	1.079
	1—2	18	0.429	1.15
	1—3	23	0.434	0.706
	1—4	16	0.381	1.286
海拔/m	1—5	16	0.432	1.252
	1—2	25.5	0.459	0.655
	2—3	18.5	0.333	0.987
	3—4	16	0.41	1.294
	4—5	12	0.387	1.602
	5—6	9.5	0.358	2.66
	1—2	25.5	0.459	0.655
	1—3	22	0.512	0.643
	1—4	24	0.615	0.392
	1—5	21	0.6	0.682
1—6	24.5	0.71	0.566	

表5 山西亚高山草地 γ 多样性指数统计表

地理梯度	范围	Richness 指数
纬度/ $^{\circ}$	35—35.5	59
	37.5—38	35
	38.5—39	56
	39—39.5	49
	39.5—40	39
经度/ $^{\circ}$	111.15—111.6	35
	111.6—112.05	49
	112.05—112.5	71
	113.4—113.85	49
	113.85—114.3	39
海拔/m	1,700—1,800	43
	2,200—2,300	68
	2,500—2,600	43
	2,600—2,700	35
	2,700—2,800	27
	3,000—3,100	26

在每一个山地, 设置的植物群落生物量调查样方数为 5 个, 通过调查植物地上茎叶和地下根系等的重量, 计算得到 4 个生物量指标, 分别为地上生物量、地下生物量、总生物量、根冠比(表 6)。由于植物群落生物量取样样方是在物种多样性取样样方的基础上设置, 因此可以构建分析 α 多样性与生物量关系的数据, 关系中这 8 个指标(Patrick 指数、Simpson 指数、Shannon 指数、Pielou 指数、地上生物量、地下生物量、总生物量、根冠比)的数据在不同样地中的分布情况见图 5。

表 6 山西亚高山草地生物量指标统计表

山地	样方	地上生物量/(g/m ²)	地下生物量/(g/m ²)	总生物量/(g/m ²)	根冠比
圣王坪	1	297	589	886	1.983
	2	251	330	581	1.315
	3	227	207.25	434.25	0.913
	4	468.75	861.5	1,330.25	1.838
	5	481	306	787	0.636
舜王坪	1	271	466	737	1.720
	2	405.25	647.5	1,052.75	1.598
	3	206.25	264.5	470.75	1.282
	4	140	411.25	551.25	2.938
	5	443.25	288.75	732	0.651
云中山	1	127.25	183.25	310.5	1.440
	2	74	140.5	214.5	1.899
	3	121	244.5	365.5	2.021
	4	106.25	529.25	635.5	4.981
	5	288.5	192.75	481.25	0.668
甸顶山	1	154.5	836.5	991	5.414
	2	66.25	221.5	287.75	3.343
	3	165.25	334.25	499.5	2.023
	4	103.75	357.5	461.25	3.446
	5	142.25	1,012	1,154.25	7.114
五台山东台	1	113.75	397.25	511	3.492
	2	114.25	594.5	708.75	5.204
	3	162.75	333.5	496.25	2.049
	4	123.5	403.25	526.75	3.265
	5	111.25	342	453.25	3.074
云顶山	1	45.25	614.75	660	13.586
	2	73.75	281	354.75	3.810
	3	70.75	215.75	286.5	3.049
	4	32.5	275.5	308	8.477
	5	52	163.25	215.25	3.139

续表 6

山地	样方	地上生物量/(g/m ²)	地下生物量/(g/m ²)	总生物量/(g/m ²)	根冠比
马仑草原	1	69	530.25	599.25	7.685
	2	79.25	390.5	469.75	4.927
	3	2.75	320.75	393.5	4.409
	4	87.25	423.5	510.75	4.854
	5	52.25	183	235.25	3.502
荷叶坪	1	167.75	632.25	800	3.769
	2	154.25	996.75	1,151	6.462
	3	317.25	820	1,137.25	2.585
	4	292.5	795	1,087.5	2.718
	5	244.5	695.25	939.75	2.844
五台山北台	1	136.75	1,250.25	1,387	9.143
	2	57.25	747.5	804.75	13.057
	3	77	1,045.5	1,122.5	13.578
	4	77.25	573.25	650.5	7.421
	5	79.5	890.5	970	11.201

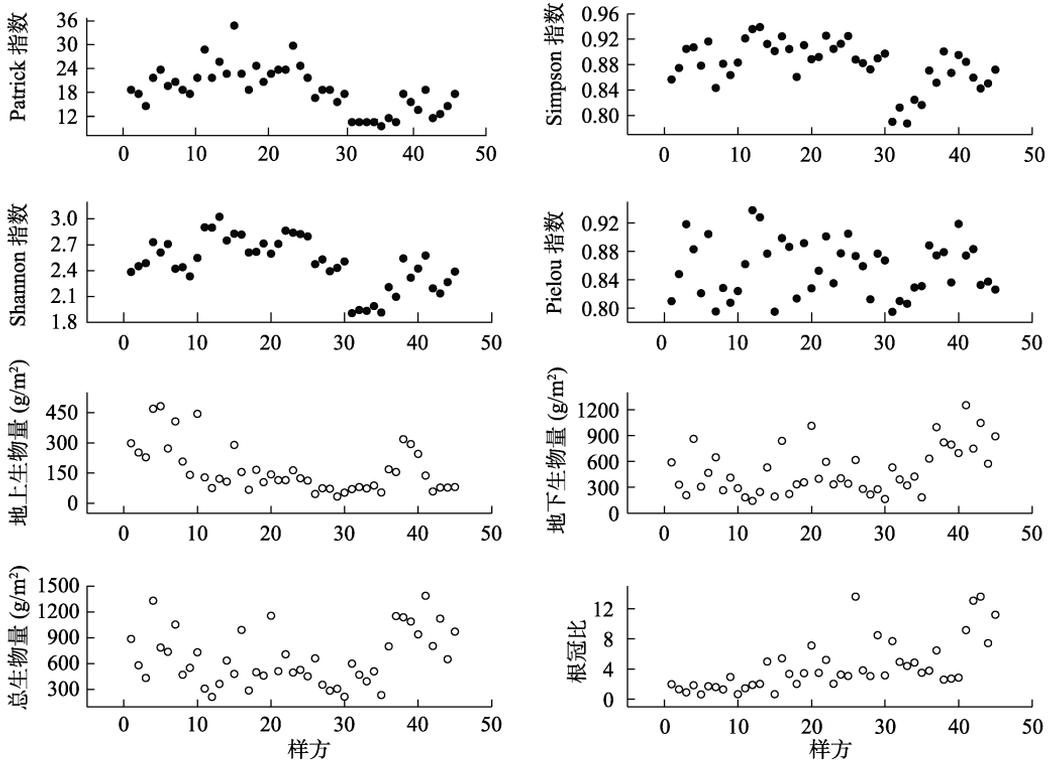


图5 山西亚高山草地 α 多样性与生物量关系的数据图

通过分析以上数据,可以得出:山西亚高山草地 α 多样性在空间上呈“中间低两头高”的单峰变化格局, β 多样性在空间上随梯度增加呈减小趋势, γ 多样性的空间分布大体符合

单峰变化格局; 生物量的空间分布趋向于高梯度, 随空间梯度增加生物量更多分配到地下部分。这些变化规律作者在文献[4]进行了详细阐述。

4.3 数据结果验证

数据验证了这一结论: 由于山西独特的“两山夹一盆”地貌结构, 其亚高山草地大都呈现南北分布, 故纬向上的物种多样性和生物量空间分布更为明显; 而亚高山草地多分布在高海拔山地, 其地上生物量对空间梯度和物种多样性变化的响应更为敏感^[4]。同时, 我们在已发表的文献[12, 19, 20]以及2016年在吕梁山进行的模拟增温实验^[21-24]中, 均得到物种多样性呈由北向南逐渐升高的空间分布格局。

5 讨论和总结

物种分布格局是多个生态过程的产物, 由于研究尺度、研究对象、研究区域等差异, 不同学者所获得的物种多样性和生物量及其关系的数据往往具有较大不同^[25]。这主要表现在: 一是通过较大地理尺度的研究来消除地形因素干扰, 忽略了小尺度地理单元中群落多样性的具体差异; 二是通过小尺度均质生境和人工群落来模拟研究, 忽略了由于尺度增大导致的较强空间异质性对多样性与生产力关系的影响; 三是在山地研究中, 只对山体进行同一空间层次水平的研究, 不能对山地整体的空间层次进行系统研究^[9,25]。对于本数据得出的物种多样性与生物量具有不同的分布格局且相互影响, 这一结果很可能是因为山西亚高山草地符合生物地理亲和力假说^[26]; 同时, 该结果也支持生物多样性是维持生产力重要途径的常识, 即更多的物种多样性可以通过物种冗余与功能互补来实现对环境变化的适应^[26]。因此, 从植物种群层面探讨自然状态下物种多样性和生物量不同层次的空间分布及其相互关系, 对于阐明生物多样性与生态系统功能关系的内在机制有着重要意义。

作者分工: 徐满厚对数据集的开发做了总体设计; 徐满厚和赵梓彤采集和处理了植被数据; 赵梓彤做了数据验证; 徐满厚撰写了数据论文。

利益冲突声明: 本研究不存在研究者以及与公开研究成果有关的利益冲突。

参考文献

- [1] Fraser, L. H., Pither, J., Jentsch, A., *et al.* Worldwide evidence of a unimodal relationship between productivity and plant species richness [J]. *Science*, 2015, 349(6245): 302–305.
- [2] Grace, J. B., Anderson, T. M., Seabloom, E. W., *et al.* Integrative modelling reveals mechanisms linking productivity and plant species richness [J]. *Nature*, 2016, 529(7586): 390–393.
- [3] Xu, M. H., Du, R., Li, X.L., *et al.* The mid-domain effect of mountainous plants is determined by community life form and family flora on the Loess Plateau of China [J]. *Scientific Reports*, 2021, 11: 10974.
- [4] Xu, M. H., Zhang, S. X., Wen, J., *et al.* Multiscale spatial patterns of species diversity and biomass together with their correlations along geographical gradients in subalpine meadows [J]. *PLoS ONE*, 2019, 14(2): e0211560.
- [5] 马丽, 徐满厚, 周华坤等. 山西亚高山草甸植被生物量的地理空间分布[J]. *生态学杂志*, 2018, 37(8): 2244–2253.
- [6] Poorter, H., Niklas, K. J., Reich, P. B., *et al.* Biomass allocation to leaves, stems and roots: Meta-analyses of interspecific variation and environmental control [J]. *New Phytologist*, 2012, 193(1): 30–50.
- [7] Duncanson, L. I., Dubayah, R. O., Enquist, B. J. Assessing the general patterns of forest structure: Quanti-

- fying tree and forest allometric scaling relationships in the United States [J]. *Global Ecology and Biogeography*, 2015, 24(12): 1465–1475.
- [8] 李晓丽, 徐满厚, 孟万忠. 模拟增温对云顶山亚高山草甸水热因子及群落结构的影响[J]. 生态学报, 2020, 40(19): 6885–6896.
- [9] 徐满厚, 李晓丽. 基于物种多样性与生物量关系的草地群落稳定性对全球变暖的响应研究进展[J]. 西北植物学报, 2021, 41(2): 348–358.
- [10] 晁倩, 温静, 杨晓艳等. 云顶山亚高山草甸植物物种多样性对模拟增温的响应[J]. 环境生态学, 2019, 1(4): 34–40.
- [11] 王誉陶, 毕玉婷, 王倩等. 山西亚高山草甸植物群落物种多样性的空间分异[J]. 中国农学通报, 2018, 34(18): 77–83.
- [12] 张世雄, 杨晓艳, 温静等. 山西吕梁山亚高山草甸物种多样性的时空变化格局[J]. 生态学报, 2018, 38(18): 6685–6693.
- [13] Xu, M. H., Ma, L., Jia, Y. Y., *et al.* Integrating the effects of latitude and altitude on the spatial differentiation of plant community diversity in a mountainous ecosystem in China [J]. *PLoS ONE*, 2017, 12(3): e0174231.
- [14] Xu, M. H., Li, X. L., Liu, M., *et al.* Spatial variation patterns of plant herbaceous community response to warming along latitudinal and altitudinal gradients in mountainous forests of the Loess Plateau, China [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2020, 172: 103983.
- [15] 徐满厚, 赵梓彤. 山西亚高山草地物种多样性与生物量调查数据集[J/DB/OL]. 全球变化数据仓储电子杂志, 2022. <https://doi.org/10.3974/geodb.2022.05.03.V1>. <https://cstr.escience.org.cn/CSTR:20146.11.2022.05.03.V1>.
- [16] 全球变化科学研究数据出版系统. 全球变化科学研究数据共享政策 [OL]. <https://doi.org/10.3974/dp.policy.2014.05> (2017年更新).
- [17] 徐满厚, 温静, 张世雄等. 模拟增温下青藏高原高寒草甸根系生物量数据集[J]. 全球变化数据学报, 2017, 1(4): 475–480.
- [18] 徐满厚. 模拟增温的青藏高原高寒草甸根系生物量实验数据集[J/DB/OL]. 全球变化数据仓储电子杂志, 2017. <https://doi.org/10.3974/geodb.2017.02.15.V1>.
- [19] 张世雄, 杨晓艳, 温静等. 吕梁山亚高山草甸物种多样性数据集(2015–2017) [J/DB/OL]. 全球变化数据仓储电子杂志, 2019. <https://doi.org/10.3974/geodb.2019.01.06.V1>.
- [20] 张世雄, 秦瑞敏, 杨晓艳等. 山西吕梁山草本群落物种多样性的海拔梯度格局及与环境因子的关系[J]. 广西植物, 2020, 40(12): 1860–1868.
- [21] 刘敏, 张潇月, 李晓丽等. 黄土高原林下草地对模拟增温的短期响应[J]. 生态学报, 2020, 40(17): 6009–6024.
- [22] 徐满厚, 杜荣, 杨晓辉等. 管涔山林下草本层植物对模拟增温的响应[J]. 中国野生植物资源, 2021, 40(10): 45–52.
- [23] 杨晓艳, 秦瑞敏, 张世雄等. 山西吕梁山草本群落对模拟增温的响应及与环境因子的关系[J]. 西南农业学报, 2020, 33(6): 1291–1300.
- [24] 杨晓艳, 张世雄, 温静等. 吕梁山森林群落草本层植物物种多样性的空间格局及其对模拟增温的响应[J]. 生态学报, 2018, 38(18): 6642–6654.
- [25] 徐满厚, 马丽, 白皓宇等. 山西吕梁山植被群落多样性的垂直空间分异[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(12): 256–260.
- [26] 朱桂丽, 李杰, 魏学红等. 青藏高寒草地植被生产力与生物多样性的经度格局[J]. 自然资源学报, 2017, 32(2): 210–222.