太行山生物多样性保护优先区域京津冀地区植被多样性与植被制图

王乐^{1†}, 董雷^{1†}, 赵志平², 陆帅志^{1,3}, 王静^{1,3}, 刘永刚⁴, 金时超^{1,3,5}, 关宏灿^{1,3}, 郭柯^{1,3*}

1. 中国科学院植物研究所, 植被与环境变化国家重点实验室, 北京 100093;
2. 中国环境科学研究院生物多样性研究中心, 北京 100012;
3. 中国科学院大学, 北京 100049;
4. 中国科学院植物研究所, 系统与进化植物学国家重点实验室, 北京 100093;
5. 南京农业大学作物表型组学交叉研究中心, 南京 210095

† 同等贡献

* 联系人, E-mail: guoke@ibcas.ac.cn

收稿日期: 2020-06-04; 接受日期: 2020-08-30; 网络版发表日期: 2020-11-17

生物多样性调查评估项目(批准号: 2019HJ2096001006)和中国科学院战略性先导科技专项(A类)(批准号: XDA19050402)资助

摘要 太行山生物多样性保护优先区域京津冀地区地理区位独特, 生态系统服务重要, 但生态系统相对脆弱, 生物多样性和生态系统保护意义重大. 本研究在收集整理以往植被研究成果和分析遥感影像的基础上, 充分利用无人机、户外智能助手等野外植被调查新技术, 采用传统的样方法和样点法对植被进行了全面清查. 共调查植物群落样方283个、样点15083个, 结果显示, 研究区植被有112个自然与半自然群系, 分属于5个植被型组共15个植被型; 另有农业植被和城市植被2个植被型组, 共6个植被型. 通过分析样方与样点数据, 本文总结了研究区主要群系的物种组成及其空间分布格局, 并在此基础上结合随机森林模型的方法编制了1:20万的植被图. 植被图统计结果表明, 自然、半自然植被共占研究区面积的85.38%, 其中灌丛、森林以及农业植被分别占47.55%、34.71%和9.79%. 研究结果不仅提供了重要的本底数据, 有助于更好地保护该区域的生态系统, 还将直接服务于全国1:50万植被图的编制.

关键词 太行山, 燕山, 植被类型, 物种组成, 空间分布, 植被图

生物多样性是人类赖以生存的基础, 是生态系统的核心组成部分^[1]. 生物多样性保护优先区是落实联合国《生物多样性公约》的重要举措, 也是《中国生物多样性保护战略与行动计划(2011–2030年)》的基本要求^[2]. 2015年发布的《中国生物多样性保护优先

区域范围》(环境保护部2015年第94号公告)规定了32个陆域生物多样性保护优先区域范围^[3]. 其中, 太行山优先区域与环首都经济圈的关系最为紧密, 是京津冀地区的重要生态屏障, 也是华北平原几条河流的主要水源地. 同时, 由于本区域人口密集, 经济社会活动强

引用格式: 王乐, 董雷, 赵志平, 等. 太行山生物多样性保护优先区域京津冀地区植被多样性与植被制图. 中国科学: 生命科学, 2021, 51: 289–299
Wang L, Dong L, Zhao Z P, et al. Vegetation diversity and mapping in the priority area of Taihang Mountains biodiversity conservation (Beijing-Tianjin-Hebei region) (in Chinese). Sci Sin Vitae, 2021, 51: 289–299, doi: 10.1360/SSV-2020-0174

烈,承担着极大的人口和生态压力,其生态安全和资源可持续利用对京津冀地区的人民生命财产安全、社会经济发展以及生态稳定均具有举足轻重的作用。

生态系统的保护是维持区域生物多样性的关键环节。植物群落是生态系统的核心组成部分,对其多样性和分布的研究有助于保护濒危物种栖息地以及区域资源合理规划与利用。近百年,植被生态学家们对全国植物群落及其分布规律做了大量详实的研究,其中标志性的成果有《中国植被》和《1:1000000中国植被图集》^[4],为我国经济社会发展、农林生产、政策制定以及科研教学等方面提供了重要的参考和指导。但是,由于人类活动和气候变化的影响,很多植被发生了变化,加上早期调查数据也有欠缺,原有植被图已经不能准确反映植物群落多样性的现状,也很难满足当前生物多样性保护和生态文明建设,以及科学研究的需求。通过调查准确掌握植物群落多样性的现状,更新高分辨率的植被图是极为重要的植被生态学研究课题。其中,理清太行山生物多样性保护优先区域的植被现状,编制植被图尤为重要。

本研究通过详尽的植被调查,获取京津冀优先区植被类型多样性方面的基础数据,揭示了京津冀太行山优先区的植被类型、分布格局、群落特征,并基于调查数据和卫星遥感影像,应用人工智能等新技术方法编制完成该地区的植被类型图(1:20万),可为评估人类活动对区域生物多样性的影响、识别保护空缺提出完善方案,为生物多样性的合理保护提供支撑。

1 研究方法

1.1 区域概况

根据《中国生物多样性保护优先区域范围》的规定,太行山生物多样性保护优先区域除太行山外还包括燕山、吕梁山等山脉的部分地区,重点保护油松(*Pinus tabulaeformis*)林、白皮松(*Pinus bungeana*)林、华山松(*Pinus armandii*)林、青扦(*Picea wilsonii*)林、白扦(*Picea meyeri*)林、华北落叶松(*Larix principis-rupprechtii*)林等针叶林以及蒙古栎(*Quercus mongolica*)林为主的暖温带落叶阔叶林生态系统和褐马鸡(*Crossoptilon mantchuricum*)等重要珍稀濒危保护物种及其栖息地^[5]。本区域属典型的暖温带大陆性半湿润-半干旱山地季风气候,气候温和,夏季高温多雨,冬季盛行西

北风,寒冷干燥^[6]。植被类型以温带落叶阔叶林和温带落叶灌木为主。

太行山生物多样性保护优先区域京津冀地区(以下简称京津冀优先保护区)特指北京、天津和河北三省(市)范围内的太行山生物多样性保护优先区域,地理范围介于38°33'13"~41°3'33"N, 113°41'32"~117°49'53"E之间(图1)。总面积约 2.1×10^4 km²,其中太行山地区面积约12716 km²,燕山地区面积约8978 km²。研究区平均海拔约800~900 m,最高峰为河北省的小五台山(海拔2882 m)。1979~2013年区域年平均降雨量约560 mm,年均温约8.3°C(Climatologies at High Resolution for the Earth's Land Surface Areas, CHELSA, <http://chelsa-climate.org/>)。华北平原的众多河流发源或流经于此,主要的河流有拒马河、潮白河、永定河等,以及官厅水库、密云水库、于桥水库等水库。

1.2 遥感影像数据来源及预处理

本文以Sentinel-2影像(10 m分辨率)为基础数据源,下载自欧洲航天局(European Space Agency, ESA)数据共享网站(<https://scihub.copernicus.eu/>)。选取2017~2019年覆盖整个生长季(5~9月)共10景影像,所选影像云量均少于5%。首先,利用ESA提供的Sen2Cor(Sentinel-2 Level-2A Atmospheric Correction Processor)插件对Sentinel-2数据进行大气校正。然后,在ArcGIS中将遥感影像镶嵌拼接到一起,并根据研究区矢量边界进行裁剪,最终得到覆盖整个研究区的完整遥感影像图。

其他辅助数据包括气温、降水、潜在蒸散量、干旱指数(aridity index, AI)等气候数据,其中气温和降水来源于CHELSA基于1979~2013年的全球气候数据集,潜在蒸散量和干旱度数据来源于CGIAR-CSI(<http://www.cgiar-csi.org/>),气候因子空间分辨率均为1 km。另外,还用到30 m空间分辨率的DEM(digital elevation model)高程数据。此外,归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)分为两种,一种通过Landsat影像波段计算求得(分辨率为30 m),另一种是使用地理空间数据云(www.gscloud.cn/sources)500 m MODIS NDVI月合成产品,以上NDVI数据均为2019年1月、4月、8月三期。

1.3 植被调查方法

植被调查是在大量前期文献调研的基础上进行实

图 1 太行山生物多样性保护优先区域京津冀地区示意图

Figure 1 Schematic diagram of the priority area of the Taihang Mountains biodiversity conservation (Beijing-Tianjin-Hebei region)

地考察。文献调研主要通过参考相关及邻近区域前人研究确定的研究区主要群系类型。本研究参考的主要植被图志包括《中国植被》^[7]、《1:1000000中国植被图集》^[4]、《中国植物区系与植被地理》^[8]、《河北植被》^[9]、《山西植被》^[10]、《内蒙古植被》^[11]、《辽宁植被与植被区划》^[12]、《北京山地植物和植被保护研究》^[13]、《小五台山植物志》^[14]，相关考察报告包括《北京百花山保护区生物多样性研究》^[15]、《北京市雾灵山自然保护区综合科学考察报告》^[16]、《北京松山自然保护区综合科学考察报告》^[17]、《河北驼梁自然保护区科学考察与生物多样性研究》^[18]等。

植被实地调查以样点调查为主，配合典型群落的样方调查。野外考察路线在调查区域内公路网和重点

保护区的基础上制定，力求路线覆盖绝大多数的区域。样点调查采用“两步路户外助手”APP，记录调查中分布面积大于1公顷(100 m×100 m)的典型植被类型，以及部分特殊类型，如宽阔的防护林带、果园、菜园等。记录内容包括样点编号、记录人、记录时间、经纬度、海拔高度、群系名称和备注等。按照《中国植物区系与植被地理》的分类原则，结合实际调查数据和《中华人民共和国植被图(1:100万)》，确定植被类型(群系水平)。样方调查参照环境保护部(现生态环境部)2017年发布的《县域植被多样性调查与评估技术规范》，并结合华北地区植被的特点进行。乔木层样方设置为20 m×20 m的正方形，并划分为4个10 m×10 m的样格进行调查。灌木层样方一般为10 m×10 m，或根据具体植物群落特征适度缩小为5 m×5 m，草本层样方

为3个1 m×1 m的小样方。

1.4 制图方法

本研究制图方法主要是基于实地样点调查数据和多源遥感数据构建随机森林(random forest)模型, 得到太行山生物多样性优先区域植被初步分类图。然后结合专家校正以提高分类精度, 并对最终分类结果进行精度评价。随机森林模型是一种基于决策树的集成学习算法, 其计算和预测在R 3.5.3(R Core Team, Austria, 2019)中实现。

考虑到Sentinel-2遥感影像特征, 本研究充分利用相关波段的光谱信息, 选用遥感影像中的4个波段, 即波段2(蓝光波段)、波段3(绿光波段)、波段4(红光波段)和波段8(近红外波段)作为光谱特征变量参与分类。同时, 选取NDVI植被指数作为指示植被生长状态和植被覆盖度的特征量, 增强植被与非植被以及不同植被类型之间的区分度。另外, 考虑到研究区地形多样化及气候特征的差异性, 研究还选用了相关地形及气候因子。根据DEM, 可提取出多种地形因子, 本文选取植被分布研究中常用的海拔、坡度、坡向、地形湿度指数(topographic wetness index, TWI), 气候因子则包括气温、降水、潜在蒸散量、干旱指数。最终, 共提取出16项分类特征变量: Sentinel-2遥感影像(波段2、3、4、8变量参数, 共4个), NDVI(1月、4月、8月, 共3个), 地形因子(海拔、坡度、坡向、TWI, 共4个), 气候因子(年均温、月最高温度、降水、潜在蒸散量、干旱指数, 共5个)。

根据野外实地样点调查, 共得到15083个样点数据, 随机选取其中的70%作为训练样本集, 用于初步建模, 另外30%作为验证样本集, 用于对分类结果进行精度评价。利用混淆矩阵(confusion matrix)的方法对随机森林模型分类结果进行精度评价, 使用Kappa系数和总体精度作为评价指标。初步分类结果经专家校正后, 随机抽取1000个样点进行实地考察验证, 并进一步修正以提高分类精度, 直到分类精度达到90%以上。

2 结果

2.1 群系类型

经统计, 研究区有112个自然和半自然群系类型,

分属于5个植被型组、15个植被型(网络版附录1)^[8]。人工植被分为农业植被和城市植被2个植被型组共6个植被型(网络版附录1)^[19]。

(1) 森林。森林包括落叶针叶林、常绿针叶林、针叶与阔叶混交林、落叶阔叶林4种植被型共37个群系类型(网络版附录1)。

研究区内落叶针叶林仅有寒温性的华北落叶松林一种, 主要分布在海拔900~2100 m的阴坡、半阴坡, 喇叭沟门的北辛店将军寨、松山的大庄科东侧和北侧山坡、大海陀自然保护区的九骨咀、三间房、大西沟、海陀山、云蒙山的主峰、雾灵山的南横岭、百花山、东灵山、小五台的飞狐峪及驼梁自然保护区等为主要分布区。华北落叶松林多生于土层较厚的棕壤, 林冠层高度12~20 m, 常混以蒙古栎、桦木(*Betula* spp.)、青扦、白扦等, 郁闭度0.6~0.8。其林下灌木层稀疏, 多由忍冬属(*Lonicera*)、茶藨子属(*Ribes*)、绣线菊属(*Spiraea*)等植物构成, 高度约1.5 m, 盖度10%~40%。草本层高度20~40 cm, 盖度40%~60%, 主要由类叶升麻(*Actaea asiatica*)、东亚唐松草(*Thalictrum minus* var. *hypoleucum*)、糙苏(*Phlomis* sp.)、风毛菊(*Saussurea* spp.)、苔草(*Carex* spp.)组成。

寒温性常绿针叶林有青扦林、白扦林、臭冷杉林, 在研究区分布面积较小; 温性常绿针叶林以油松(*Pinus tabulaeformis*)林、侧柏(*Platycladus orientalis*)林为主, 分布较广。青扦林、白扦林多分布在海拔1600~2500 m的阴坡、半阴坡, 主要在小五台山、雾灵山零星分布。臭冷杉林仅在小五台山有小片零星分布, 在南石窑对面山梁海拔1600~2200 m之间的阴坡存小片纯林。油松林分布广泛, 面积约占到针叶林总面积的50%, 多分布在海拔200~1200 m的阴坡、半阴坡。侧柏林分布面积约占到针叶林的40%, 其喜暖、耐旱, 多分布在海拔600~1000 m的阳坡, 也有一些分布在阴坡, 多靠近居民点。常绿针叶林林冠层高度以侧柏林最低, 云冷杉林最高, 多在5~18 m。云冷杉林郁闭度多在0.7以上, 林下阴湿, 灌草层欠发达。灌木层高度1~1.5 m, 盖度多在25%以下, 以忍冬属、丁香属(*Syringa*)、蔷薇属(*Rosa*)、绣线菊属等为主。草本层高约30 cm, 盖度不到50%, 由糙苏(*Phlomis umbrosa*)、东亚唐松草、舞鹤草(*Maianthemum bifolium*)、鼠掌老鹳草(*Geranium sibiricum*)、苔草等构成。温性常绿针叶林郁闭度为0.5~0.8, 灌木层盖度一般不足20%, 在林冠

相对稀疏开阔的地方可达50%, 由绣线菊属、胡枝子属(*Lespedeza*)、鼠李(*Rhamnus* spp.)、山杏(*Armeniaca sibirica*)、荆条(*Vitex negundo* var. *heterophylla*)等组成, 草本层盖度可达70%, 由苔草、黄背草(*Themeda japonica*)、红柴胡(*Bupleurum scorzonerifolium*)、棉团铁线莲(*Clematis hexapetala*)、风毛菊(*Saussurea* spp.)、苔草、隐子草(*Cleistogenes* spp.)等组成。

落叶阔叶林乔木层主要由栎属(*Quercus*)、桦属(*Betula*)、杨属(*Populus*)、椴属(*Tilia*)、榆属(*Ulmus*)植物和刺槐(*Robinia pseudoacacia*)等树种构成单优或多优群落, 形成约24个群系类型。蒙古栎林是分布范围最广、面积最大的森林类型, 占比超过研究区面积的10%, 其可在海拔700~1800 m的阴坡、半阴坡及较高海拔阳坡广泛分布。蒙古栎林的林冠层高约8 m(5~12 m), 郁闭度多为0.6~0.8, 胸径平均13 cm(5~23 cm), 乔木密度约1800株/公顷。白桦林主要分布在海拔1000~1600 m的阴坡、半阴坡, 分布范围受限, 研究区内大面积长势良好的成熟白桦林出现在海坨山及雾灵山, 并且常与其他桦木混生。桦木林冠层高度8~16 m, 郁闭度0.7~0.8, 灌木层高度1~1.5 m, 盖度40%~60%, 草本层高度30~60 cm, 盖度30%~50%。桦树林乔木层构成复杂, 常与蒙古栎、山杨(*Populus davidiana*)、椴树等镶嵌、混生, 也可与华北落叶松构成针阔混交林。山杨林多分布在海拔800~1300 m的阴坡、半阴坡的中下部。核桃楸(*Juglans mandshurica*)林多呈狭长带状分布, 分布于海拔800~1200 m的沟谷中。刺槐林常不连成片状分布, 多集中在靠近居民点的低山、丘陵区。总体上, 落叶阔叶林灌木层片以忍冬(*Lonicera* spp.)、山楂叶悬钩子(*Rubus crataegifolius*)、毛叶丁香(*Syringa tomentella*)、土庄绣线菊(*Spiraea pubescens*)、溲疏(*Deutzia* spp.)、毛榛(*Corylus mandshurica*)等为主, 更新层常见元宝槭(*Acer truncatum*)、蒙椴(*Tilia mongolica*)、花曲柳(*Fraxinus rhynchophylla*)等幼苗, 草本层以玉竹(*Polygonatum odoratum*)、糙苏、东亚唐松草、短尾铁线莲(*Clematis brevicaudata*)、银背风毛菊(*Saussurea nivea*)、三脉紫菀(*Aster ageratoides*)、兴安升麻(*Cimicifuga dahurica*)、华北耧斗菜(*Aquilegia yabeana*)、露珠草(*Circaea cordata*)、大披针苔草(*Carex lanceolata*)及蕨类等植物为主。生于低山、丘陵的刺槐林林下物种组成较为特殊, 其灌木层以荆条为主, 其次有绣线菊、鼠李、酸枣(*Ziziphus jujuba* var.

spinosa)、蚂蚱腿子(*Myrica dioica*)等, 草本层以铁杆蒿(*Artemisia gmelinii*)、黄背草、白羊草(*Bothriochloa ischaemum*)、野古草(*Arundinella anomala*)等为主。

(2) 灌丛。灌丛主要分为落叶阔叶灌丛与常绿草叶灌丛2类, 共46个群系类型(网络版附录1)。分布最广的灌丛为荆条灌丛、山杏灌丛及三裂绣线菊(*Spiraea trilobata*)灌丛。山杏灌丛多分布在500~1000 m海拔区域, 荆条灌丛抗旱、耐瘠薄, 多分布在200~600 m海拔范围, 而在海拔400~700 m范围常出现山杏+荆条灌丛, 由于燕山地势总体来讲西部高、东南部低, 所以出现西部山杏多、东部荆条多、中部山杏+荆条灌丛的格局, 而在太行山荆条灌丛广泛分布。另外, 从坡向的角度来看, 荆条灌丛和山杏灌丛常出现在干旱的阳坡及石质化严重的山坡, 两者约占到研究区总面积的30%以上。荆条灌丛高度1.5~2.5 m, 盖度40%~60%, 伴生种主要为酸枣、小叶鼠李(*Rhamnus parvifolia*)、山杏、胡枝子(*Lespedeza* spp.)等, 其草本层高度40 cm, 盖度40%~50%, 主要为铁杆蒿、大披针苔草、野青茅(*Deyeuxia arundinacea*)、北京隐子草(*Cleistogenes hancei*)、远志(*Polygala tenuifolia*)、龙须菜(*Asparagus schoberioides*)、白羊草、黄背草等。山杏灌丛高度1.5~3 m, 盖度50%~70%, 伴生种主要为绣线菊、大果榆(*Ulmus macrocarpa*)、胡枝子、鼠李、酸枣, 草本层高度30 cm, 盖度40%~60%, 主要为大披针苔草、野青茅、大油芒(*Spodiopogon sibiricus*)、远志、委陵菜(*Potentilla* spp.)、地榆、中华草沙蚕(*Tripogon chinensis*)等。绣线菊灌丛多生于海拔700~1100 m的山坡顶部, 灌木层高1~2 m, 盖度60%~80%, 主要有绣线菊、鼠李、胡枝子、蚂蚱腿子、虎榛子(*Ostryopsis davidiana*)、草本层高20~40 cm, 盖度20%~40%, 主要为铁杆蒿、委陵菜、地榆(*Sanguisorba officinalis*)、北柴胡(*Bupleurum chinense*)、苍术(*Atractylodes lancea*)、苔草、北京隐子草、大油芒、野古草等。

(3) 草原。草原主要分布在张家口地区海拔1000~1500 m之间的开阔高平原、山间盆地及丘陵地区, 主要由多年生丛生禾草、根茎禾草以及苔草、杂类草等组成。研究区草原分为丛生草类草原、根茎草类草原、半灌木与小半灌木草原3种植被型, 共5个群系类型(网络版附录1)。

丛生草类草原为大针茅(*Stipa grandis*)草原、长芒

草(*S. bungeana*)草原。根茎草类草原为羊草(*Leymus chinensis*)草原。半灌木与小半灌木草原为铁杆蒿草原、华北米蒿(*Artemisia giraldii*)草原。长芒草是一种较喜暖的旱生植物,在本区分布面积不大。长芒草原盖度通常为50%~70%,建群种分盖度20%~50%,伴生有糙隐子草(*Cleistogenes squarrosa*)、短花针茅(*Stipa breviflora*)、达乌里胡枝子(*Lespedeza davurica*)、铁杆蒿、阿尔泰狗娃花(*Heteropappus altaicus*)、糙叶黄芪(*Astragalus scaberrimus*)、狭叶米口袋(*Gueldenstaedtia stenophylla*)、糙叶败酱(*Patrinia rupestris*)等。羊草原盖度常30%~60%,主要伴生有克氏针茅(*Stipa krylovii*)、糙隐子草、柴胡(*Bupleurum* spp.)、线叶菊(*Filifolium sibiricum*)、华北岩黄芪(*Hedysarum gmelinii*)、蓬子菜(*Galium verum*)、野火球(*Trifolium lupinaster*)、达乌里胡枝子等。铁杆蒿草原群落盖度为45%~65%,铁杆蒿分盖度可达30%~50%,草本层高度30~50 cm,其他优势物种有华北米蒿、长芒草、白羊草,主要伴生物种有达乌里胡枝子、冷蒿(*Artemisia frigida*)、祁州漏芦(*Rhaponticum uniflorum*)、防风(*Saposhnikovia divaricata*)、远志、蓝花棘豆(*Oxytropis coerulea*)、野古草、隐子草等。

(4) 草甸与草丛。研究区的草甸与草丛包括丛生草类草甸、根茎草类草甸、杂类草草甸、草丛4个植被型,共16个群系类型(网络版附录1)。

草甸生长条件通常中度湿润,主要分布在高原河漫滩及亚高山地区,其中亚高山草甸仅分布在小五台山、海坨山、东灵山及雾灵山的山巅,此外在拒马河、桑干河沿岸以及一些水库附近还有一些盐生草甸和沼泽化草甸。丛生草类草甸有苔草(*Carex* spp.)草甸、早熟禾(*Poa* spp.)典型草甸。根茎草类草甸为野青茅(*Deyeuxia arundinacea*)草甸、嵩草(*Kobresia bellardii*)+苔草草甸、大披针苔草+地榆草甸、长芒稗(*Echinochloa caudata*)草甸、大叶章(*Deyeuxia purpurea*)草甸。杂类草草甸有龙牙草(*Agrimonia pilosa*)草甸、地榆草甸、拳蓼(*Polygonum bistorta*)草甸、辽藁本(*Ligusticum jeholense*)+地榆杂类草草甸、地榆+金莲花(*Trollius chinensis*)杂类草草甸及苍耳(*Xanthium sibiricum*)杂类草草甸。山地及亚高山草甸多由中生植物组成,物种丰富,群落盖度60%~90%,常见植物有苔草属、早熟禾属、羊茅属(*Festuca*)、棘豆属(*Oxytropis*)、委陵菜属、蓼属(*Polygo-*

num)、柴胡属(*Bupleurum*)、地榆、石竹(*Dianthus* spp.)等。长芒稗草甸与苍耳杂类草草甸多生于河漫滩,建群种占据绝对优势,群落结构简单,盖度常可达100%。

草丛往往为林地或灌丛被反复砍伐、水土流失严重土壤贫瘠地区,主要分布在海拔较低、土壤较薄的低山丘陵地区。草丛分为白羊草草丛、大油芒草丛、黄背草草丛3种。白羊草草丛盖度40%~75%,高度40~80 cm,主要物种为胡枝子、铁杆蒿、隐子草、华北米蒿(*Artemisia giraldii*)、风毛菊(*Saussurea* spp.)。黄背草草丛盖度50%~90%,建群种黄背草占据绝对优势,高度40~100 cm,其他伴生植物有白羊草、铁杆蒿、隐子草、委陵菜、苔草、野古草等。

(5) 沼泽与水生植被。研究区的沼泽与水生植被主要围绕河流、水库、湿地形成,包括草本沼泽、水生植被共8个群系类型(网络版附录1)。草本沼泽有头状穗莎草(*Cyperus glomeratus*)沼泽、扁秆藨草(*Scirpus planiculmis*)沼泽、芦苇(*Phragmites australis*)沼泽、香蒲(*Typha orientalis*)沼泽、千屈菜(*Lythrum salicaria*)沼泽、黑三棱(*Sparganium stoloniferum*)沼泽、酸膜叶蓼(*Polygonum lapathifolium*)沼泽,水生植被有莲(*Nelumbo* spp.)群落。沼泽中芦苇沼泽在研究区分布面积最大,通常水深1 m以下,群落中芦苇高度可达3~5 m,盖度可达90%以上。水生植被莲群落由人工栽培而成,主要用于观赏,通常生于0.5~1 m深的水体,盖度可达95%以上。

(6) 农业植被与城市植被。研究区农业植被种植偏向于经济作物,其果园分布面积约占研究区总面积的5%,其中1/3为板栗。北京地区昌平至怀柔区域常沿谷地至山坡广泛种植板栗。平谷大规模种植桃,也有少量梨和苹果。张家口市的怀来县,多种植葡萄、提子。承德市的兴隆县南部至遵化市,广泛种植板栗。而粮食作物占到研究区总面积的5%,并且河北地区远高于北京地区。总体来讲,近北京周边地区农田多种植经济作物,其他区域农田多种植玉米、冬小麦、高粱等。根据调查资料统计,该区农业植被可分为粮食作物——玉米、小麦、高粱、黍及杂粮等;油料作物——油葵;菜园——白菜、卷心菜等蔬菜;果园——苹果、桃、杏、葡萄、柿子、枣、板栗、核桃、山楂等;其他经济作物——苗圃、向日葵等。研究区的城市植被主要为城市公园植被^[19]。

2.2 植被图

随机森林模型预测结果准确率为60.08%, Kappa系数为0.5514. 经专家校正并合并相邻同属性图斑后共计有图斑数10749个, 准确率达90%以上. 112种自然、半自然植被类型中可上图的植被类型共有96种. 农业植被进一步划分为19个亚类, 城市植被1个亚类, 无植被地带4类(建筑、道路、裸地和水体)(附植被图, 网络版附录2和3).

植被图统计结果表明, 自然、半自然植被总共占到研究区面积的85.38%, 其中灌丛、森林以及农业植被为区域所占面积最多的植被类型, 分别占总面积的47.55%、34.71%和9.79%(表1). 群系方面, 荆条灌丛面积约5227.48 km², 占区域总面积的24.11%. 森林类型中面积前三位的分别为蒙古栎林(2693.51 km², 12.42%)、油松林(1400.69 km², 6.46%)和侧柏林(1029.62 km², 4.75%)(网络版附录2). 草原、草甸和草丛所占面积较小, 且多为原生植被被砍伐或开垦后的次生群落.

农业植被占总面积的9.79%, 以粮食作物和果园为主(表1). 建筑(含道路)及裸地分别占总面积的3.08%和0.28%, 裸地多为开山采矿后留下的裸露地表, 部分为自然灾害导致的山体裸露(表1). 其他群系类型面积见网络版附录2.

3 讨论

3.1 区域植物群落多样性

太行山植被类型众多, 区系历史古老, 生物资源丰富. 本研究通过实地考察结合文献调研共整理出本区域的自然和半自然群系类型112种共15个植被型, 及农业植被与城市植被的6个植被型(网络版附录1)^[19]. 丰富的植被类型与本区域的区系历史和多样化的环境条件有关. 首先, 太行山地区区系历史较为古老, 区域内有较多第三纪孑遗植物, 如青檀(*Pteroceltis tatarinowii*)、臭椿(*Ailanthus altissima*)、漆树(*Toxicodendron vernicifluum*)等. 尤其是荆条、白羊草、黄背草等第三纪残留的孑遗植物的广泛分布, 证明了本区域植被区系成分的古老性^[9]. 同时, 太行山处于蒙古高原、黄土高原以及华北平原地理交汇处, 周边区系成分的植被类型多有侵入与交流, 为区域植被多样性提供了丰富的物种来源, 如大针茅为典型的蒙古草原成分^[8], 金露

表 1 不同植被型组和植被型面积及所占比例

Table 1 Area and percentage of vegetation formation groups

植被型组	植被型	面积(km ²)	比例(%)
森林	落叶针叶林	381.52	1.76
	常绿针叶林	2442.27	11.26
	针叶与阔叶混交林	332.49	1.53
	落叶阔叶林	4368.63	20.15
	合计	7524.91	34.71
灌丛	常绿草叶灌丛	0.66	<0.01
	落叶阔叶灌丛	10309.33	47.55
	合计	10309.99	47.55
草原	丛生草类草原	103.28	0.48
	根茎草类草原	2.61	0.01
	半灌木与小半灌木草原	371.79	1.71
	合计	477.68	2.20
草甸与草丛	草丛	102.5	0.47
	根茎草类草甸	37.73	0.17
	丛生草类草甸	11.94	0.06
	杂类草草甸	18.36	0.08
	合计	170.53	0.79
沼泽与水生植被	草本沼泽	20.16	0.09
	水生植被	8.82	0.04
	合计	28.98	0.13
农业植被	果园	1029.4	4.75
	粮食作物	1053.43	4.86
	菜园	24.98	0.12
	其他经济作物	15.44	0.07
	合计	2123.25	9.79
城市植被	城市公园植被	0.57	<0.01
无植被地带	建筑	667.78	3.08
	裸地	60.44	0.28
	水体	317.86	1.47
	合计	1046.08	4.82
总计		21681.99	100.00

梅(*Potentilla fruticosa*)和迎红杜鹃(*Rhododendron mucronulatum*)等属于从西南云贵一带北迁至此, 而华北落叶松和白栎等则带有一定的寒冷成分南下性质^[9]. 其次, 京津冀优先区海拔落差较大, 从最低的太行山东坡山麓到最高的小五台山, 海拔落差达2800 m以上. 巨大的海拔落差导致了较大的生境差异, 为本区域丰富

多样的植被类群奠定了基础。除广泛分布的蒙古栎林、油松林、荆条灌丛等典型的温带落叶阔叶林和灌丛外,尚有栓皮栎林等暖性落叶阔叶林以及鬼箭锦鸡儿(*Caragana jubata*)灌丛、金露梅灌丛等耐寒落叶灌丛以及嵩草草甸等高寒山地植被^[8]。最后,本区域地处太平洋季风区迎风坡,降水相对丰沛,夏季暴雨较多。太行山半湿润到半干旱地区过渡的山地气候性质,决定了其气候和植被的多样性,同时也决定了其植被对环境变化比较敏感。

通过1:20万植被图统计结果可知,灌丛和森林是京津冀优先区最主要的植被类型,二者合占区域总面积的80%以上。其中又以灌丛分布范围最广,植被类型也最为丰富。灌丛的面积占研究区总面积的47.55%,并贡献了自然、半自然植被群系类型的41.07%(表1)。灌丛在太行山和燕山山地广泛分布,低山区大部分属于森林破坏后人类活动长期影响下形成的次生群落^[9,20,21]。灌丛生态系统是目前区域生态系统功能最主要的提供者,对区域生物多样性维持、水源涵养和水土保持等具有重要作用^[22]。次生的灌丛是未来向蒙古栎等温带森林群落恢复演替的基础^[23,24]。

京津冀优先区的森林覆盖面积约为34.71%,并呈现出北高南低的趋势(燕山地区高于太行山地区)。其中最具代表性的为蒙古栎林、另有油松林、侧柏林等暖性常绿针叶林。这些广布的群系对本区域生态系统服务功能的维持和生物栖息地的保护具有不可替代的作用。此外,青檀林、紫椴(*Tilia amurensis*)林、核桃楸林、黄檗(*Phellodendron amurense*)林等国家重点保护物种为建群种的群系也是本区域生物多样性保护的重点^[13]。

3.2 人类活动对区域植被的影响

人类活动对植被的影响主要分为砍伐、开垦、人工林建植、城镇建设等^[25]。太行山地区植被类型虽然比较丰富,但遭受的干扰也很严重。太行山地区开发较早,据记载至少有3000年以上的历史^[9]。由于历史上的森林被大量砍伐,加之本区域人口比较密集,尤其东部地区人口众多,人类活动对生态环境的压力巨大。因此,本区域原始的植被类型大部分已经被破坏,目前植被以次生植被为主,只有高山上有少量残存的原生草甸和落叶灌木^[9]。

在本区域有大面积人工种植的林地,其中针叶林

包括油松林、侧柏林、华北落叶松林,阔叶林以刺槐林为主,这些人工林大多已经归化为半自然林^[9]。大规模的人工造林一方面有利于当地的植被恢复,但也有可能产生负面影响。一方面,大规模的人工林往往林分组成单一,生态功能和生态系统稳定性较差,且抗病虫害能力较弱^[26];其次,不合理的造林可能加剧地下水的消耗^[27];不适当的物种选择还有可能造成外来物种的入侵等生态问题^[28]。太行山部分地区是火灾易发区,防火压力较大。尤其是人工油松林和侧柏林,物种组成单一、油脂含量高、材质易燃^[29],极易受火灾以及病虫害的影响。

尽管近年来的“退耕还林”政策实施力度不断加大,但区域内农业植被仍然占有较大比重。本研究绘制的1:20万植被图显示,农业植被占总面积的9.79%,其中粮食作物集中分布在涞源县城周边和蔚县东北方向,而在燕山地区东部则有大片果园分布(网络版附录3)。农业植被可能引起的水土流失以及对地下水的消耗都可能对区域生态造成负面影响。

在无植被地段中,城镇建筑(含道路)及裸地分别占总面积的2.41%和0.95%。建筑主要为城镇和乡村建设用地,也包括部分工矿企业建筑。随着经济社会的快速发展,建设用地也随之快速扩张,研究表明,1990~2015年间,太行山地区土地利用变化中的近40%为建设用地的增加,且主要由耕地转化而来^[30]。城市的扩张和交通网线的延伸是造成区域植被退化的重要因素^[31]。裸地主要集中在区域南部的涞源县和阜平县一带,多为开山采矿后留下的裸露山体,如涞源县城东南的一处矿坑,谷歌影像显示,至少在20世纪80年代便已开始形成,至今直径已近2 km,并全部为裸露岩石,植被恢复难度极大。

3.3 植被图绘制

eCognition突破了基于光谱信息进行影像分类的局限性,提出面向对象的影像分析技术,大大提高了高空间分辨率数据的自动识别精度,有效满足了本研究的科研需求。然而,分割过程中有两个需要重点注意的地方。首先是波段的选择,Sentinel-2影像有13个波段,经过多次实验比较,选择红、绿、蓝及近红外共4波段能将区域植被更有效地区分。这4个波段也是植被图自动分类中普遍采用的波段^[32]。其次,Scale parameter设置300或400最能满足1:20万甚至更高精度植

被制图的要求. 随着Scale parameter设置值越小, 分割出的斑块会成倍增加, 可能造成数据冗余.

多源遥感影像的气候变量、地形变量等环境变量中, 对本研究群系类型预测起到主要作用的变量依次为NDVI(Landsat波段计算而来)、Sentinel-2影像2~4波段、降雨、温度、海拔、坡度、坡向等^[33-35]. 分析认为, NDVI、Sentinel-2影像红黄蓝波段是与植被最为贴合的光谱变量信息, 另外, 水热因子对群系分布起到主要作用, 而地形通过对水热因子的再分配, 也间接对群系的预测起重要作用. 研究区域群系类型达一百余种, 制图过程中不同群系的光谱特征较难区分, 尤其是同属、同外貌特征、同生态习性的群系类型, 所以选择多时相、多环境变量是非常必要的^[33,34,36].

值得注意的是, 尽管本研究使用了多源遥感和多种环境数据, 配合一万五千余个实地调查样点(实际建模使用10000个以上), 随机森林分类的精确度仍然只有60%左右. 后续仍需花费大量时间进行专家校正, 以达到所需准确率的要求. 因此, 基于计算机的自动分类仍需探索更为精确和高效的分类方法.

分辨率高的影像数据对植被预测更为有效. Landsat影像的NDVI比MODIS影像的NDVI数据更有效. 分辨率1 km×1 km的土壤数据对群系的预测几乎起不到作用. 另外, 可能是由于样点数据较密, 故而分辨率太低的数据反而会影响预测精度. 下一步的研究可更多选择国产的高分系列等更高精度的多源遥感影像^[37].

参考文献

- 1 Zhang Q G, Zhang D Y. Biodiversity and ecosystem functioning: recent advances and controversies (in Chinese). *Biodivers Sci*, 2002, 10: 49–60 [张全国, 张大勇. 生物多样性与生态系统功能: 进展与争论. 生物多样性, 2002, 10: 49–60]
- 2 Xue D Y, Wu J Y, Zhao F W. Actions, progress and prospects in implementation of the Convention on Biological Diversity during the past 20 years in China (in Chinese). *Biodivers Sci*, 2012, 20: 623–632 [薛达元, 武建勇, 赵富伟. 中国履行《生物多样性公约》二十年: 行动、进展与展望. 生物多样性, 2012, 20: 623–632]
- 3 Announcement on issuing “Priority areas for biodiversity conservation in China” (in Chinese). http://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgg/201601/t20160105_321061.htm [关于发布《中国生物多样性保护优先区域范围》的公告. http://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgg/201601/t20160105_321061.htm]
- 4 Hou X Y. Vegetation Atlas of China (in Chinese). Beijing: Science Press, 2001. 129–132 [侯学煜. 1:1000000中国植被图集. 北京: 科学出版社, 2001. 129–132]
- 5 Li J S, Jin Y C, Wang W et al. Priority Area for Terrestrial Biodiversity Conservation in China (in Chinese). Beijing: Science Press, 2016 [李俊生, 靳勇超, 王伟, 等. 中国陆域生物多样性保护优先区域. 北京: 科学出版社, 2016]
- 6 Yang Y H, Wang Z P, Sakura Y S, et al. Effects of global warming on productivity and soil moisture in Taihang Mountain: A transplant study (in Chinese). *Chin J Appl Ecol*, 2002, 13: 667–671 [杨永辉, 王智平, 佐仓保夫, 等. 全球变暖对太行山植被生产力及土壤水分的影响. 应用生态学报, 2002, 13: 667–671]
- 7 Editorial Committee of Vegetation of China. Vegetation of China (in Chinese). Beijing: Science Press, 1980. 1–738 [《中国植被》编辑委员会. 中国植被. 北京: 科学出版社, 1980. 1–738]
- 8 Chen L Z, Sun H, Guo K. Geography of Flora and Vegetation in China (in Chinese). Beijing: Science Press, 2015. 264–333 [陈灵芝, 孙航, 郭柯. 中国植物区系与植被地理. 北京: 科学出版社, 2015. 264–333]
- 9 Liu L. Vegetation of Hebei (in Chinese). Beijing: Science Press, 1996. 364 [刘廉. 河北植被. 北京: 科学出版社, 1996. 364]
- 10 Ma Z Q. Vegetation of Shanxi (in Chinese). Beijing: Science and Technology Press of China, 2001. 303 [马子清. 山西植被. 北京: 中国科学技术出版社, 2001. 303]
- 11 Inner Mongolia and Ningxia Comprehensive Investigation Team of Chinese Academy of Sciences. Vegetation of Inner Mongolia (in Chinese). Beijing: Science Press, 1985. 884 [中国科学院内蒙古宁夏综合考察队. 内蒙古植被. 北京: 科学出版社, 1985. 884]
- 12 Dong H D. Vegetation and Regionalization of Liaoning (in Chinese). Shenyang: Press of Shenyang University, 2011. 597 [董厚德. 辽宁植被与植被区划. 沈阳: 辽宁大学出版社, 2011. 597]
- 13 Cui G F. Research on Mountain Plant and Vegetation Protection in Beijing (in Chinese). Beijing: China Forestry Publishing House, 2008. 232 [崔国发. 北京山地植物和植被保护研究. 北京: 中国林业出版社, 2008. 232]

- 14 Zhao J Z. Flora of Xiaowutai Mountain (in Chinese). Beijing: Science Press, 2011. 636 [赵建成. 小五台山植物志. 北京: 科学出版社, 2011. 636]
- 15 Wang Z C, Ma G Q, Wang J Z. Study on Biodiversity of Baihuashan Nature Reserve in Beijing (in Chinese). Beijing: Beijing Publishing House, 2009. 168 [王志臣, 马国青, 王九中. 北京百花山保护区生物多样性研究. 北京: 北京出版社, 2009. 168]
- 16 Xing S H. Comprehensive Scientific Investigation Report of Wuling Mountain Nature Reserve in Beijing (in Chinese). Beijing: China Forestry Publishing House, 2013. 184 [邢韶华. 北京市雾灵山自然保护区综合科学考察报告. 北京: 中国林业出版社, 2013. 184]
- 17 Du L H. Comprehensive Scientific Investigation Report of Beijing Songshan Nature Reserve (in Chinese). Beijing: China Forestry Publishing House, 2012. 232 [杜连海. 北京松山自然保护区综合科学考察报告. 北京: 中国林业出版, 2012. 232]
- 18 Zhao J C, Wu Y F, Guan W L. Scientific Investigation and Biodiversity Study of Tuoliang Nature Reserve, Hebei (in Chinese). Beijing: Science Press, 2008. 482 [赵建成, 吴跃峰, 关文兰. 河北驼梁自然保护区科学考察与生物多样性研究. 北京: 科学出版社, 2008. 482]
- 19 Guo K, Fang J Y, Wang G H et al. A revised scheme of vegetation classification system of China (in Chinese). 2020, 44: 111–127 [郭柯, 方精云, 王国宏, 等. 中国植被分类系统修订方案. 植物生态学报, 2020, 44: 111–127]
- 20 Tang L L, Yang T, Liu H Y, et al. Distribution and species diversity patterns of *Vitex negundo* var. *heterophylla* shrublands in North China (in Chinese). Chin J Plant Ecol, 2019, 43: 825–833 [唐丽丽, 杨彤, 刘鸿雁, 等. 华北地区荆条灌丛分布及物种多样性空间分异规律. 植物生态学报, 2019, 43: 825–833]
- 21 Li S, Yang B, Wu D. Community succession analysis of naturally colonized plants on coal gob piles in Shanxi Mining areas, China. *Water Air Soil Pollut*, 2008, 193: 211–228
- 22 Zhang C X. Preliminary study on the bio-ecological characteristics of soil and water conservation shrub-*Vitex negundo* var. *heterophylla* (in Chinese). Dissertation for Master's Degree. Beijing: Beijing Forestry University, 2007 [张春霞. 水土保持灌木-荆条的生物生态学特性初步研究. 硕士学位论文. 北京: 北京林业大学, 2007]
- 23 Zhao Y, Wu M Z, Wei W, et al. The variation of carbon storage during the community succession processing in hilly region of Taihang Mountain (in Chinese). J Soil Water Conserv, 2009, 23: 208–212 [赵勇, 吴明作, 樊巍, 等. 太行山丘陵区群落演替进程中碳贮量变化特征. 水土保持学报, 2009, 23: 208–212]
- 24 Yu X X, Zhang X M, Wang X B. Vegetation community features and succession law of natural shrubs in Beijing mountainous area (in Chinese). J Beijing Forest Univ, 2008, s2: 107–111 [余新晓, 张晓明, 王雄宾. 北京山区天然灌丛植被群落特征与演替规律. 北京林业大学学报, 2008, s2: 107–111]
- 25 Zhang Z T. Planning and management effectiveness assessment of nature reserves in Hebei Province (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Baoding: Hebei Agricultural University, 2009 [张智婷. 河北省自然保护区规划和管理有效性评估. 博士学位论文. 保定: 河北农业大学, 2009]
- 26 Shen R X, Luo Y Q, Yang W. The current situation of plantation diseases and pests and the control strategies in China (in Chinese). World Agric, 2000, 9: 36–37 [沈瑞祥, 骆有庆, 杨旺. 我国人工林病虫害现状及控制对策. 世界农业, 2000, 9: 36–37]
- 27 Feng X, Fu B, Piao S, et al. Revegetation in China's Loess Plateau is approaching sustainable water resource limits. *Nat Clim Change*, 2016, 6: 1019–1022
- 28 Wang S M. Study on plant species, distribution pattern and their influcing factors of invasive alien plants in Beijing (in Chinese). Dissertation for Master's Degree. Beijing: Beijing Forestry University, 2012 [王苏铭. 北京地区外来入侵植物种类、分布格局及其影响因素研究. 硕士学位论文. 北京: 北京林业大学, 2012]
- 29 Zhu M, Liu X D, Li X H, et al. Assessment of the impact of fuel management in *Pinus tabulaeformis* forests in the Beijing West Mountain Area (in Chinese). Acta Ecol Sin, 2015, 35: 248–256 [朱敏, 刘晓东, 李璇皓, 等. 北京西山油松林可燃物调控的影响评价. 生态学报, 2015, 35: 248–256]
- 30 Xue C L, Zhao Y L, Wei X F, et al. Analysis of driving mechanism of land-use change in Taihang Mountainous areas based on CCA (in Chinese). J Guizhou Norm Univ (Nat Sci), 2019, 37: 93–103 [薛朝浪, 赵宇鸾, 魏小芳, 等. 基于CCA的太行山区土地利用变化驱动机制分析. 贵州师范大学学报(自然科学版), 2019, 37: 93–103]
- 31 Lv G X, Chen Y M, Zou C X, et al. Spatial pattern and driving factors of vegetation degradation in Beijing-Tianjin-Hebei (in Chinese). J Ecol Rural Environ, 2017, 33: 417–425 [吕国旭, 陈艳梅, 邹长新, 等. 京津冀植被退化的空间格局及人为驱动因素分析. 生态与农村环境学报, 2017, 33: 417–425]
- 32 Wright R. Remote sensing techniques in vegetation mapping—A review of some uses and limitations. *Trans Botanical Soc Edinburgh*, 1973, 42:

69–81

- 33 Lee J, Shuai Y, Zhu Q. Using images combined with DEM in classifying forest vegetations. In: IGARSS 2004. 2004 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Anchorage. 2004. New York: IEEE, 2004. 2362–2364
- 34 Rodriguez-Galiano V F, Chica-Olmo M, Abarca-Hernandez F, et al. Random Forest classification of Mediterranean land cover using multi-seasonal imagery and multi-seasonal texture. *Remote Sens Environ*, 2012, 121: 93–107
- 35 Adam E, Mutanga O, Rugege D. Multispectral and hyperspectral remote sensing for identification and mapping of wetland vegetation: a review. *Wetlands Ecol Manage*, 2013, 18: 281–296
- 36 Xie Y, Sha Z, Yu M. Remote sensing imagery in vegetation mapping: a review. *J Plant Ecol*, 2008, 1: 9–23
- 37 Wang H, Wang C, Wu H. Using GF-2 imagery and the conditional random field model for urban forest cover mapping. *Remote Sens Lett*, 2016, 7: 378–387

Vegetation diversity and mapping in the priority area of Taihang Mountains biodiversity conservation (Beijing-Tianjin-Hebei region)

WANG Le¹, DONG Lei¹, ZHAO ZhiPing², LU ShuaiZhi^{1,3}, WANG Jing^{1,3}, LIU YongGang⁴,
JIN ShiChao^{1,3,5}, GUAN HongCan^{1,3} & GUO Ke^{1,3}

¹ State Key Laboratory of Vegetation and Environmental Change, Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, China;

² Research Center for Biodiversity, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China;

³ University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

⁴ State Key Laboratory of Systematic and Evolutionary Botany, Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, China;

⁵ Plant Phenomics Research Center, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China

The priority area of Taihang Mountains biodiversity conservation (Beijing-Tianjin-Hebei region) has a unique geographical location and provides significant ecosystem services. The conservation of vegetation diversity is particularly urgent because of its fragile ecosystem. Based on the reviews of previous studies and remote-sensing analyses, we conducted an investigation into the vegetation using new technologies combined with traditional quadrat and point collection methods. A total of 283 plots and 15,083 sampling points were surveyed. The results showed that there were 112 natural and semi-natural plant alliances within the study area, which could be categorized into 5 vegetation formation groups and 15 vegetation formations. Moreover, artificial vegetation included two vegetation formation groups (agricultural and urban vegetation) and six vegetation formations. This paper also summarized the composition of species and the spatial distribution patterns of major plant formations in the region. On this basis, we generated a 1:200,000 vegetation map by random forest model. Statistical analysis for the vegetation maps showed that natural and semi-natural vegetation accounted for 85.38% of the study area, of which shrubs, forests, and agricultural vegetation accounted for 47.55%, 34.71%, and 9.79%, respectively. Our research provides valuable data on vegetation which is not only beneficial for drafting ecosystem protection policies in the corresponding area but can also be used for the compilation of 1:500,000 vegetation maps.

Taihang Mountains, Yan Mountains, vegetation type, species composition, spatial distribution, vegetation map

doi: 10.1360/SSV-2020-0174