

doi: 10.12029/gc20200621

卫晓锋, 樊刘洋, 孙紫坚, 何泽新, 孙厚云, 魏浩. 2020. 河北承德柴白河流域地质建造对植物群落组成的影响[J]. 中国地质, 47(6): 1869–1880.  
Wei Xiaofeng, Fan Liuyang, Sun Zijian, He Zexin, Sun Houyun, Wei Hao. 2020. The influence of geological formation on plant community composition in Chaibai River Basin, Chengde, Hebei Province[J]. *Geology in China*, 47(6):1869–1880(in Chinese with English abstract).

## 河北承德柴白河流域地质建造对植物群落组成的影响

卫晓锋<sup>1</sup>, 樊刘洋<sup>1</sup>, 孙紫坚<sup>1,2</sup>, 何泽新<sup>1</sup>, 孙厚云<sup>1,2</sup>, 魏浩<sup>3</sup>

(1. 北京矿产地质研究院有限责任公司, 北京 100012; 2. 中国地质大学(北京), 北京 100083;  
3. 河北地质大学, 河北 石家庄 050031)

**摘要:**为探讨承德柴白河流域植物群落组成的主要影响因素, 支撑流域生态环境保护, 本文采用植被样方和地质建造调查以及元素地球化学测试方法, 从空间特征、养分和水分供给能力方面, 分析了花岗岩、流纹岩、白云岩、砂砾岩 4 类地质建造对植被群落组成的影响: 在相近的气候条件下, 花岗岩土壤层厚大, 基岩非贯通性裂缝发育, 磷等养分含量高和水分保蓄性最优, 利于深根乔木生长。流纹岩土壤层厚度较小, 基岩贯通性裂缝发育, 磷等养分含量高和水分保蓄性一般, 以深根灌丛生长为主。白云岩土壤层薄, 紧闭型贯通裂隙发育, 钙等养分含量高和水分保蓄性差, 适宜浅根性灌丛和少量喜钙浅根乔木。砂砾岩土壤层最薄, 养分含量低, 裂隙不发育, 保蓄水性差, 适合耐旱灌丛生长。

**关键词:**空间特征; 土壤养分; 水分供给; 植被群落; 地质建造; 柴白河流域; 承德市; 河北省

**中图分类号:** Q948.15    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1000-3657(2020)06-1869-12

## The influence of geological formation on plant community composition in Chaibai River Basin, Chengde, Hebei Province

WEI Xiaofeng<sup>1</sup>, FAN Liuyang<sup>1</sup>, SUN Zijian<sup>1,2</sup>, HE Zexin<sup>1</sup>, SUN Houyun<sup>1,2</sup>, WEI Hao<sup>3</sup>

(1. *Beijing Institute of Mineral Geology Co., Ltd., Beijing 100012, China*; 2. *China University Of Geosciences (Beijing), Beijing, 100083, China*; 3. *Hebei GEO University, Shijiazhuang, 050031, Hebei, China*)

**Abstract:** In order to explore the dominating influences on the composition of vegetational community in the Qaidam Baihe River Basin of Chengde, Hebei Province, for supporting the ecological environment protection, the authors conducted detailed investigation of the community and field survey of the geological formation as well as test on elemental geochemistry, and then analyzed the response of vegetational community composition to the geological formation, which includes granite intrusive rock, rhyolite volcanic rock, dolomite carbonate rock and sandy conglomerate clastic rock from the perspective of spatial feature, nutrient as well as water supply under the similar climate condition. The granite formations are characterized by thick soil, non-continuous fractures, high nutrient content of phosphorus and optimal water retention capacity, which are favorable for the deep-rooted arborous species. The rhyolite formations have relatively less thickness of soil, with interpenetrating fractures in the substrate, high nutrient content of phosphorus, but relatively poor water retention capacity compared with granite formations, which are beneficial

收稿日期: 2020-06-18; 改回日期: 2020-09-26

基金项目: 中国地质调查局项目(DD20160229-01, DD20190822)及河北省重点研发计划项目(192242051)联合资助。

作者简介: 卫晓锋, 男, 1981年生, 高级工程师, 现从事基础地质、生态地质调查研究; E-mail: yanchixiaowei@163.com。

to deep-rooted shrub. The dolomite formations have the features of thin soil layer, with tightly closed through fissures, high nutrient content of calcium, but poor water retention capacity, which are favorable for the growth and development of shallow-rooted shrub and a small amount of calcium-like shallow-root trees. Compared with another formations, the dolomite formations are characterized by the thinnest soil, low nutrient content, and poor water retention capacity, without fracture developing, which are suitable for the drought-tolerant shrub.

**Key words:** spatial feature; soil nutrient; water supply; plant community; geological formation; Chaibai River Basin; geological survey engineering; Chengde; Hebei Province

**About the first author:** WEI Xiaofeng, male, born in 1981, senior engineer, mainly engages in the investigation and study of mineral resources and environmental geology; E-mail: yanchixiaowei@163.com.

**Fund support:** Supported by the Project of China Geological Survey (No. DD20160229-01, No. DD20190822) and Key Research and Development Projects of Hebei Province (No. 192242051).

## 1 引 言

植物群落是生物群体和环境条件共同驱动形成的集合,植物群落物种组成和多样性是岩石圈、土壤圈、水圈、大气圈和生物圈等地上因子群和地下因子群共同作用的产物(Fernando, et al., 2015)。植物群落形成环境包括微环境、生境、大环境三种空间尺度。其中微环境和生境(小气候或者生物气候),强调小范围内的特定栖息地,与局部地形、土壤类型和水文条件密切相关;大环境气候条件包括温度、降水、相对湿度、日照等,基本不受局部地形、植被、土壤影响,而受大气环流的地理纬度、离海远近等大范围因素的影响(李振基等, 2014),不同的空间尺度,各类环境因子的影响作用不同。生态学和植物学研究多关注气候作用对植物群落特征的影响,强调大环境气候条件为植物生长提供必需的水分和光热条件(Stephenson, 1990)。但在一个相近或者相似的微环境或者生境空间内,气温和降雨等气候条件很难解释不同的植物群落组成差异与共存现象(邱扬等, 2000; 田海芬等, 2014)。

岩石风化形成的疏松表层土壤是陆地植物生长的基质,在相同、相近气候条件下,不同岩石类型会孕育不同的微环境和生境,影响植物种群空间分布格局(Brady et al., 2005; Morford et al., 2011; Hahm et al., 2014),因此,在一定气候带(区)内植物群落组成差异形成多与地下因子群关系密切(何政伟等, 2003),对维持生态平衡起着决定性的作用(黄建军, 2015)。在地质学上,在一定的地质构造条件下所产生的具有成因联系的一套岩石的共生组合,称为地质建造(地质矿产部地质辞典办公室,

2005)。从微环(生)境空间研究尺度,探讨不同地质建造的风化成土、水文循环、养分供给等地质作用过程对植物群落物种组成的影响,可进一步辨识影响群落结构类型、稳定程度、抗入侵能力等特性的控制因素(Kennedy et al., 2002; 龙汉利等, 2013),提升生态系统稳定性(Gamfeldt et al., 2008),为生态环境保护 and 修复提供科学指导。

本文以柴白河流域的花岗岩、流纹岩、白云岩、砂砾岩4类地质建造为对象,基于遥感获取的不同地质建造区地表植被覆盖,结合地表植被样方调查和天然、人工基岩剖面观察,分析地质建造对根系形态和构型、养分供给、水分保蓄的影响过程,探讨柴白河流域地质建造对地表植被群落组成控制作用。

## 2 地质背景及研究方法

### 2.1 地质背景

承德柴白河流域大地构造位置处于华北陆缘燕山板内造山带的中生代陆相火山沉积盆地(张运强等, 2014; 关秀宇等, 2018)。研究区出露地层主要为中元古代蓟县群的雾迷山组( $J_{xw}$ )和少量长城群高于庄组( $Chg^{2-3}$ )的泥晶白云岩、砂质白云岩、粉晶白云岩等,分布于研究区的南部,面积为97.59 km<sup>2</sup>; 侏罗纪后城组第二、三岩性段( $J_2tch^{2-3}$ )的砂岩、粉砂夹泥岩、透镜状砾岩,分布于研究区的东北部,面积为116.35 km<sup>2</sup>; 侏罗纪张家口组( $J_{z}$ )的流纹质火山碎屑岩,分布于研究区的北部,面积为187.89 km<sup>2</sup>,呈断层接触关系。岩浆岩主要为侏罗纪中细粒二长花岗岩,分布于研究区的西北部,面积为80.15 km<sup>2</sup>(图1)。

承德市处于燕山与内蒙古高原过渡带,气候类

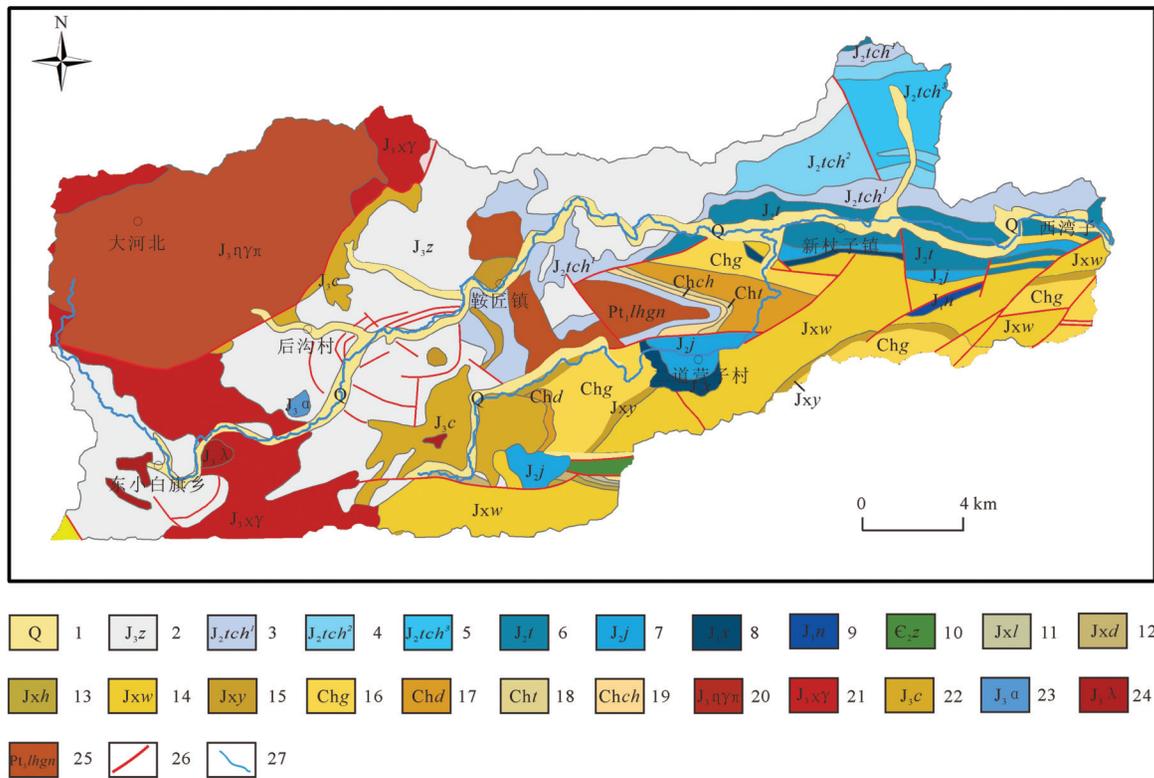


图1 柴白河流域地质图

1—第四系;2—张家口组凝灰岩;3—后城组一段砾岩;4—后城组二段砂砾岩;5—后城组三段砂岩;6—髻髻山组安山岩;7—九龙山组砂岩;8—下花园组砂砾岩;9—南大岭组安山岩;10—张夏组灰岩;11—老虎顶白云岩;12—代庄子白云岩;13—洪庄子组白云岩;14—雾迷山组白云岩;15—杨庄组白云岩;16—高于庄组白云岩;17—大红峪组石英砂岩;18—团山子组白云岩;19—串岭沟组页岩;20—二长花岗岩;21—碱性花岗岩;22—石英正长斑岩;23—安山岩;24—流纹岩;25—片麻岩;26—断裂;27—河流

Fig. 1 Regional geological map of Chaibai River Basin

1—Quaternary; 2—Zhangjiakou Formation tuff; 3—The first member of Houcheng Formation conglomerate; 4—The second member of Houcheng Formation glauconite; 5—The third member of Houcheng Formation sandstone; 6—Tiaojishan Formation andesite; 7—Jiulongshan Formation sandstone; 8—Xiahuayuan Formation glauconite; 9—Nandaling Formation andesite; 10—Zhangxia Formation limestone; 11—Laohuding Formation dolomite; 12—Daizhuangzi Formation dolomite; 13—Hongshuizhuang Formation dolomite; 14—Wumishan Formation dolomite; 15—Yangzhuang Formation dolomite; 16—Gaoyuzhuang Formation dolomite; 17—Dahongyu Formation quartz sandstone; 18—Tuanshanzi Formation dolomite; 19—Chuanlinggou Formation shale; 20—Monzonitic granite; 21—Alkali granite; 22—Quartz syenite porphyry; 23—Andesite; 24—Rhyolite; 25—Gneiss; 26—Fault; 27—River

型为寒温带向暖温带过渡,半干旱向半湿润过渡,大陆性、季风型燕山山地气候。年降雨量500~800 mm,无霜期92~180 d,年有效积温2800~3980℃,年日照时数2500~3100 h(刘园园等,2018)。柴白河流域位于承德盆地南缘,流域面积为481.98 km<sup>2</sup>,根据中国气象网气象数据统计:2019年月平均气温-7.2~24.7℃,月平均日照时数161.6~288.5 h,月平均日降雨量≥0.1 mm,日数0~16 d,月平均降雨量0~151.7 mm。在相似的海拔高程和气候条件下,乔-灌-草的植被类型组成明显不同:流域上游西部以马尾松针叶林和蒙古栎等阔落叶森林为主,流域中下游南部以灌丛为主,少量侧柏针叶林,北部以阔叶林和

乔木为主,东部以稀疏的阔落叶灌丛为主。

## 2.2 研究方法

**野外调查:**采用路线调查和典型地质剖面解剖的方法,自北至南选择3条路线,在不同的地质建造单位内选择高程、坡度、坡向相似(近)的地貌单元内开展植被样方调查,样方大小20 m×20 m,记录植物种类、数量、高度、胸径、冠幅,同时就近选择典型的剖面观察,记录土壤层、风化壳的厚度,基岩层的产状、裂隙特征,并采集土壤层样品。

**遥感数据处理:**本文采用研究区2016年5月13日的Landsat 8 OLI数据,数据空间分辨率30 m。经过辐射定标、几何校正、大气校正后计算研究区的

NDVI值。研究区的植被覆盖度是使用像元二分模型估算得出(李苗苗,2003;张学玲等,2018),即: $f_c = (NDVI - NDVI_{soil}) / (NDVI_{veg} - NDVI_{soil})$ ,其中 $NDVI_{veg}$ 和 $NDVI_{soil}$ 分别取NDVI值累积频率置信度(5%~95%)区间的最大值(0.883875)和最小值(0.046520)。根据地质建造图中花岗岩、流纹岩、白云岩、砂砾岩4类地质建造分布,并通过ArcGIS的分区统计工具分别统计每个建造内的植被覆盖度分布范围并计算其平均值。

土壤层样品采集及室内测试:剥离顶部腐殖层10~20 cm和外层的黏土,在新鲜层5~10 m内采集3~5处土壤样品混合为1个样品,样品原始重量大约1 kg。将样品分别放入棉质新的样品袋内,标识清晰,带回室内,在自然通风条件下风干后,送至承德华勘五一四地矿测试研究有限公司进行全量检测。分析项目包括N、P、K<sub>2</sub>O、CaO、MgO、S、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、B、Mn、Cu、Zn、Mo、Cl、SiO<sub>2</sub>、Na<sub>2</sub>O、Co、Ni、Se、Ge、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>和Ti共21项。

### 3 地质建造与植被群落特征

#### 3.1 地质建造类型划分

以1:25万承德幅区域地质和1:5万地质调查报告图件为基础,结合野外实际验证,编制了研究区地质建造图,重点突出浅表岩石组合分布特征,水平(缓倾)产状选择顶部岩层,垂直(陡倾)岩层选

择厚度较大岩层,特殊岩层单独分列。根据岩石成岩作用的差异,划分出花岗岩、流纹岩、白云岩、砂砾岩四种建造类型(图2)。

#### 3.2 地质建造空间特征

在构造活动的升降或者断层作用塑造区域宏观地貌格局过程中,不同的岩石类型在相同(近)地质作用过程中,风化作用强度不同,形成了多样的岩石地貌景观(路洪海,2013),控制风化物质侵蚀、搬运、堆积过程,制约基岩层-残积层-坡积层-土壤层的空间分布。同时山区的土壤层往往较薄,但基岩层会发育各类节理裂隙,为植物根系生长提供不同的物理空间,影响了植物对养分和水分的利用能力,控制植物的分布和生长(Canadell et al.,1996; Richter et a.,2015)。

花岗岩建造区以低山圆丘地貌为主,相对高差一般为100~200 m,坡度集中25~45°,残积层厚度为10~20 cm,坡积层厚度大于100 cm,土壤层厚度大于20 cm(图3a)。浅部岩石层发育多与风化作用有关的非构造节理,非构造节理属于波浪型、锯齿状的非贯通型节理,节理密度较小,平均1~2个/1 m,张开度多>5 mm,以张开型为主,风化的残积物及土壤等充填物厚度可达数10 cm,形成厚层充填物(图3b);流纹岩建造区发育锐峰、岩嶂等地貌,相对高差一般为40~100 m,坡度多大于45°,残积层厚度为0~10 cm,坡积层厚50~80 cm,土壤层厚10~20 cm

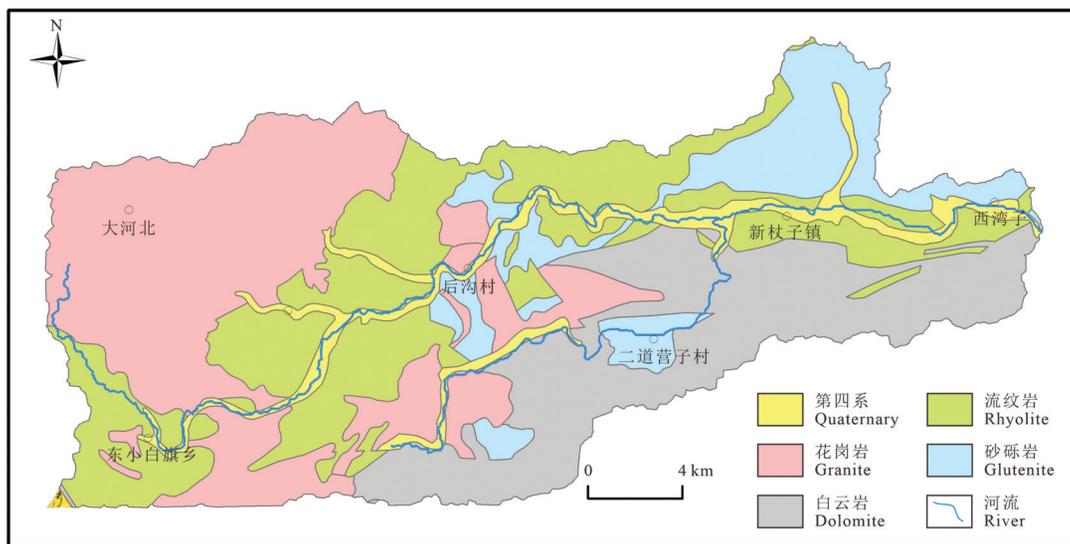


图2 柴白河流域地质建造图  
Fig.2 Regional geological formation map of Chaibai River Basin



图3 不同地质建造的植被覆盖与裂隙发育特征

a—花岗岩地貌及植被特点;b—花岗岩裂隙发育特征;c—流纹岩地貌及植被特点;d—流纹岩裂隙发育特征;e—碳酸盐岩地貌及植被特点;f—碳酸盐岩裂隙发育特征;g—砂砾岩地貌及植被特点;h—砂砾岩裂隙特征

Fig.3 Structural characteristics of the key zones of the earth in different geological formations

a—Morphology and vegetation characteristics of granite; b—Fracture characteristics of granite; c—Morphology and Vegetation characteristics of rhyolite; d—Fracture characteristics of rhyolite; e—Morphology and Vegetation characteristics of carbonate; f—Fracture characteristics of carbonate; g—Morphology and Vegetation characteristics of glutenite; h—Fracture characteristics of glutenite

(图3c)。岩石风化程度相对较弱,发育平直型、锯齿状的贯通性节理,节理密度平均为2~3个/1 m,张开度集中在1.0~5.0 mm和>5 mm,属于中等张开程

度,风化残积物多属于断续充填(图3d);白云岩建造多形成峻峭山,相对高差一般为100~200 m,坡度大于45°,残积层厚0~10 cm,坡积层厚度小于50

表1 不同建造单元植被覆盖度分布面积比例(%)

Table 1 Vegetation coverage distribution area proportion of different formation units

建造类别	裸地比例	低覆盖度	中低覆盖度	中覆盖度	中高覆盖度	高覆盖度	平均覆盖度
花岗岩	0.55	2.45	2.99	6.61	14.99	72.41	81.17
流纹岩	0.60	3.72	4.42	7.68	20.76	62.82	76.28
白云岩	0.35	1.37	1.90	3.48	10.95	81.95	84.40
砂砾岩	0.95	5.35	11.5	22.94	26.50	32.76	64.18

注:覆盖度比例=该等级覆盖度面积/所属建造区总面积×100%;平均覆盖度=建造区覆盖度所有值累加/该建造区面积。

cm,土壤层厚度小于10 cm(图3e)。岩层产状陡倾,岩层倾角集中于65~70°,发育顺层节理、斜向节理为二次生构造节理。节理形态多为平直型,节理面的密度较高,平均10~15个/1m,间距为1~5 cm,顺层节理张开度在0.1~1.0 mm,属于密闭型,斜向节理张开度在1.0~5.0 mm,属于张开型,节理的延展性较好,多为半贯通—贯通性的,充填物含量较少,形成薄膜或者断续充填(图3f)。砂砾岩建造区多形成低缓丘陵地貌,相对高差一般为小于50 m,残积层厚10~20 cm,坡积层厚大于100 m,土壤层厚0~10 cm(图3g)。仅在浅表岩石层育弱非构造节理,多为锯齿状、台阶型非贯通性的节理,节理密度较小,平均3~5个/1m,张开度多为1.0~5.0 mm,中等张开型,延展性不好,充填物多呈断续充填(图3h)。

### 3.3 植被覆盖度及种群特征

根据植被覆盖分级编码表,将植被覆盖度分为6个等级(刘玉安等,2012):裸地(0~15%)、低覆盖(15%~30%)、中低覆盖(30%~45%)、中覆盖(45%~

60%)、中高覆盖度(60%~75%)、高覆盖度(75%~100%),统计分析不同地质建造单元的植被覆盖度(表1,图4):

花岗岩建造区植被覆盖度以高覆盖度和中高覆盖度为主,平均植被覆盖度81.17%,其中高覆盖度地区占该区总面积的72.4%。中覆盖度和中低覆盖度除主要分布在阳坡和山谷外,在花岗岩裸露基岩顶部也有分布。裸地和低覆盖度仅沿山谷或河谷分布,分布面积小于3%。流纹岩建造区植被覆盖度以高覆盖度和中高覆盖度为主,平均覆盖度76.28%,其中高覆盖度占该区总面积的62.82%;中高覆盖度大量分布于山体阳坡,占该区总面积的20.76%,裸地及低覆盖度仅分布于山谷或河谷地区,分布较少。白云岩建造区以高覆盖度为主,平均植被覆盖度84.40%,其中高覆盖度占该区总面积的81.94%,裸地和低覆盖度分布在山谷和河谷两侧,总面积小于2%,沿白云岩区山脊线有中低覆盖度分布。砂砾岩建造区以丘陵和低山地貌为主,平

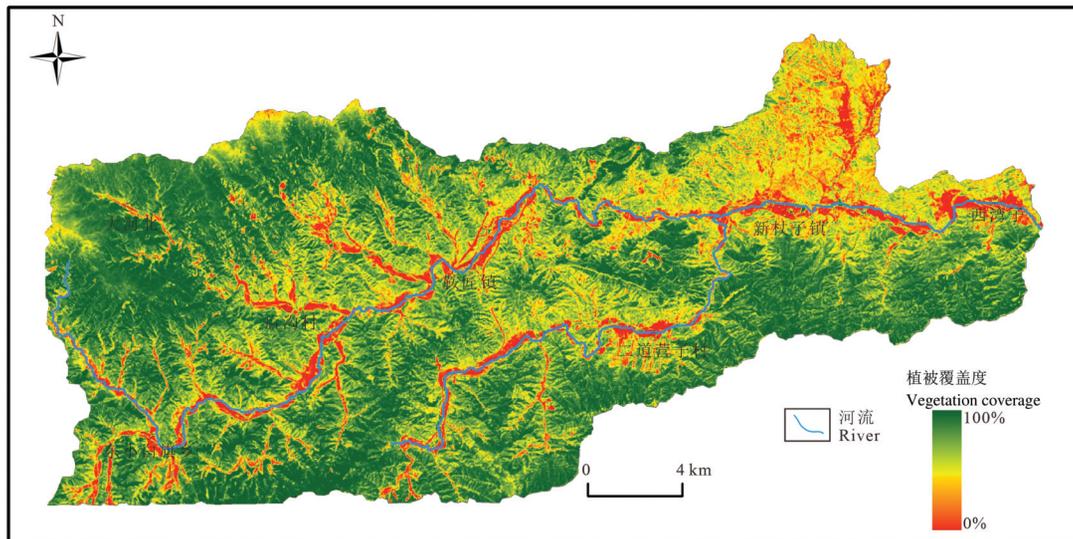


图4 柴白河流域植被覆盖度图

Fig.4 Vegetation coverage map of Chaibai River Basin

均植被覆盖度64.18%。高覆盖度主要分布于低山阴坡,占该区总面积的32.76%;中高覆盖度分布于低山阳坡和丘陵地区,占该区总面积的26.50%。中低覆盖度在丘陵区大量分布,裸地及低覆盖度不光分布于山谷或河谷地区,在丘陵顶部也有分布。

基于地质建造和流域地貌的承德蟠龙湖地区大比例尺地质遗迹调查不同地质建造区内植被覆盖度高低与森林、灌丛、草本植被类型的组成密切相关。花岗岩区植被种类以森林植被为主,植被包括针叶林和阔叶林,针叶林以马尾松(*Pinus massoniana* Lamb)、油松(*Pinus tabulaeformis* Carrière)为主,阔叶林以蒙古栎(*Quercus mongolica* Fisch. ex Ledeb)、辽东栎(*Quercus mongolica* Fisch. ex Ledeb)、楸树(*Catalpa bungei* C. A. Mey)等为主,以及山杏、板栗、山楂等各类经济林乔木。流纹岩区以灌丛植被为主,植被以落叶阔叶灌丛为主,阳坡多为荆条(*Vitex negundo* L. var. *heterophylla* (Franch.) Rehd.)、小叶鼠李(*Rhamnus parvifolia* Bunge)、锦鸡儿(*Caragana sinica* (Buc'hoz) Rehder),阴坡多为土庄绣线菊(*Spiraea pubescens*)、小花溲疏(*Deutzia parviflora* Bunge)、毛榛(*Corylus mandshurica* Maxim.)、胡枝子(*Lespedeza bicolor* Turcz.)。白云岩区以灌丛植被为主,森林植被为辅。以落叶阔叶灌丛为主,阳坡多为荆条(*Vitex negundo* L. var. *heterophylla* (Franch.) Rehd.)、酸枣(*Ziziphus jujuba*)、锦鸡儿(*Caragana sinica* (Buc'hoz) Rehder)等。森林多为侧柏(*Platycladus orientalis* (L.) Franco)为主,少量臭椿(*Ailanthus altissima*)。山地的阴坡山脚出现小叶三点金(*Desmodium microphyllum*)多年生草本。砂砾岩区以稀疏灌丛植被为主,少量人工针叶林和经济林。灌丛以落叶阔叶灌丛为主,阳坡的荆条(*Vitex negundo* L. var. *heterophylla* (Franch.) Rehd.)、锦鸡儿(*Caragana sinica* (Buc'hoz) Rehder)等,少量为油松(*Pinus tabulaeformis* Carrière)人工林。

## 4 讨论

研究区处于低山丘陵区,不同地质建造类型对植被群落组成的影响主要体现在3个方面:空间结构和裂隙发育影响植被根系形态及空间分布;岩石风化土壤提供植物生长需要的营养元素;土壤水以

及浅层基岩裂隙水赋存能力满足植物生长的水分需求。

### 4.1 地质建造空间结构制约根系构型

植物根系提供给地上部分生长的水分、活性质和矿质营养,根系形态和构型决定了根系对地下资源的利用程度(张宇清等,2003)。不同地质建造空间结构影响根系形态和根系构型发育,深根型的植物只能生长在土层较厚或者岩石裂隙发育的区域,土壤较薄或者岩石裂隙不发育的区域只适宜浅根型植物生长(国振杰等,2008;嵇晓雷等,2012;刘鸿雁等,2019)。

花岗岩建造区的风化程度较高,具有疏松深厚的半风化母质层(图5a),同时基岩层发育非贯通性张性裂隙,充填物较厚。野外观察马尾松自然生长与张性裂隙产状一致(图5b),因此,花岗岩的基岩裂隙为油松、马尾松常绿针叶林和蒙古栎阔叶落叶深根性植被等的生长提供物理空间(张立彬等,2014),形成了花岗岩建造区以垂直状、辐射状根系为主的森林植物群落结构。流纹岩建造区的风化程度较低,风化层较薄(图5c),但基岩层发育贯通性张性裂隙,深根性植物根系穿过土壤或岩石,可获取深层的水分和养分(图5d),因此多适宜具有辐射状根系的灌丛生长和少量乔木生长。白云岩建造区风化程度较弱,土体浅薄,一般小于20 cm,同时多发育贯通性密闭型裂隙,无法满足深根性乔木生长需求(图5e),但贯通性裂隙为具有发达根系的灌丛生长提供空间,部分灌丛植物根系岩裂隙穿透逾2 m,可以获得深层土壤养分和水分(李阳兵等,2002)(图5f),因此白云岩植被覆盖度虽然较高,但多以辐射状、扁平状、串联状根系为主的灌丛植物群落为主。局部生长浅根性侧柏乔木,该种类侧根发达,萌芽性强,白云岩张性裂隙或者坡积层较厚的区域可提供生长空间。砂砾岩区岩性较疏松,易风化侵蚀,土壤层较薄(图5g),岩石层多发育非贯通性裂隙,裂隙延伸性较差,因此仅适宜荆条等根茎萌发力的强辐射状、须状根系为主灌丛植物种群(图5h),坡积层厚度较大,可以适当进行人工造林。

### 4.2 地质建造物质组成提供养分来源

植物生长必需的氮(N)、磷(P)、钾(K)、钙(Ca)、镁(Mg)、硫(S)、硅(Si)等7种元素均主要来自土壤供给(宫进钟,2006)。其中土壤中的P、K、



图5 不同地质建造植物根系形态特征

a、b—花岗岩建造区根系特征；c、d—流纹岩建造区根系特征；e、f—白云岩建造区根系特征；g、h—砂砾岩建造区根系特征

Fig. 5 Morphological characteristics of plant roots in different geological formations

a, b—Root characteristics of granite formation; c, d— Root characteristics of rhyolite formation; e, f—root characteristics of carbonate formation; g, h— Root characteristics of glutenite formation

表2 不同建造区土壤中元素含量统计  
Table 2 Statistical table of element content in soil of different formation areas

建造单元		N/10 <sup>6</sup>	P/10 <sup>6</sup>	K <sub>2</sub> O/10 <sup>2</sup>	CaO/10 <sup>2</sup>	S/10 <sup>6</sup>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /10 <sup>2</sup>	YXN /(mg/kg)	SXP /(mg/kg)	SXK /(mg/kg)	SOM/10 <sup>2</sup>	pH
花岗岩类 侵入岩 (733)	最小值	194.00	155.00	0.88	0.37	62.15	2.03	11.43	0.38	16.42	0.23	4.42
	最大值	8072.00	6008.00	7.88	20.20	849.34	14.03	777.37	352.90	1959.00	22.20	9.58
	平均值	1708.33	706.74	2.74	1.68	216.31	5.06	162.91	22.77	157.52	3.64	6.45
	标准差	1141.26	478.41	0.50	1.42	109.55	1.13	113.32	35.73	125.06	2.96	0.81
流纹岩类 火山岩 (690)	最小值	0.00	84.27	1.42	0.27	73.76	2.26	11.96	0.55	28.85	0.38	4.39
	最大值	6146.00	4478.00	5.14	22.56	609.32	10.28	615.20	635.40	1111.00	15.57	8.56
	平均值	1549.96	539.37	2.83	1.25	197.22	4.86	147.78	27.13	160.39	3.09	6.30
	标准差	889.51	282.58	0.43	0.96	86.66	0.66	84.47	51.34	106.15	2.22	0.78
白云岩类 碳酸盐 (443)	最小值	286.00	121.50	0.30	0.54	71.37	0.57	21.25	0.34	5.78	0.34	4.22
	最大值	10575.00	2142.00	5.51	27.59	1202.00	9.15	837.00	328.00	738.30	28.77	9.47
	平均值	2105.48	608.66	2.26	4.43	281.64	4.58	178.98	12.51	181.04	4.47	7.59
	标准差	1411.57	297.46	0.63	4.37	147.36	1.10	116.39	26.73	98.03	3.51	0.65
砂砾岩类 碎屑岩 (445)	最小值	274.00	118.00	0.66	0.25	68.05	0.87	21.25	0.29	30.02	0.24	4.82
	最大值	9297.00	2051.00	7.50	13.88	915.49	11.63	873.43	317.90	1080.00	23.07	8.91
	平均值	1199.02	642.93	2.77	2.10	180.19	4.97	109.36	16.65	159.61	2.24	7.24
	标准差	749.46	270.88	0.54	1.52	78.11	0.81	71.60	24.43	98.91	1.81	0.88

Ca、Mg主要来自于岩石矿物风化分解,因此不同的成土母岩风化形成的土壤元素含量不同,对植物的养分供给能力不同。

P元素是植物细胞核的重要成分,是植物体内生理代谢活动必不可少、但往往缺少的一种元素,土壤溶液中磷的主要来源是长期的岩石风化矿物质提供(孙向阳,2005)。土壤中全磷和速效磷的含量不同,会影响植物生长养分的供给能力,是决定植被群落的组成重要因素之一。速效磷含量在10~15 mg/kg,一般的松树和阔叶树均能正长生长,速效磷接近50 mg/kg,能满足多种植被生长,小于2 mg/kg会出现缺磷现象(孙向阳,2005)。

根据不同的地质建造区的土壤养分元素统计(表1)显示:花岗岩类建造区土壤P含量为155.00~6008.00 mg/kg,平均为706.74 mg/kg,速效磷含量为0.38~352.90 mg/kg,平均为22.77 mg/kg;流纹岩建造区土壤P含量为84.27~4478.00 mg/kg,平均为539.37 mg/kg,速效磷含量为0.55~635.40 mg/kg,平均为27.13 mg/kg;白云岩建造区土壤P含量为121.50~2142.00 mg/kg,平均为608.66 mg/kg,速效磷含量为0.34~328.00 mg/kg,平均为12.51 mg/kg;砂砾岩建造区土壤含量为118.00~2051.00 mg/kg,平均为642.93 mg/kg,速效磷含量为0.29~317.90 mg/

kg,平均为16.65mg/kg,全磷含量高低为花岗岩类>砂岩类>白云岩类>流纹岩类。花岗岩类、流纹岩类中含磷矿物主要是氟磷灰石,白云岩类主要是碳氟磷灰石(俞政一,1998),岩石中含磷矿物成分差异会影响土壤中的磷含量的高低。土壤中速效磷(水溶性磷化合物和弱酸溶性磷化合物)含量表征了可被植物利用的元素含量,速效磷含量高低为流纹岩类>花岗岩类>砂岩类>白云岩类。土壤中全磷含量与速效磷含量的负相关性变化趋势受速效形态与迟效形态之间的转化条件影响:流纹岩类、花岗岩类岩石中的长石等矿物含量较高,风化形成大量的云母类、蒙脱石类等2:1膨胀型黏土矿物,膨胀型黏土矿物增大了矿物晶格破坏对磷释放的趋势,从而增加了水溶性磷化合物含量(周丽丽等,2017);另一方面,土壤对磷的吸附主要通过静电引力的非专性吸附和配位体交换的专性吸附,土壤pH值大小会影响土壤对磷的吸附(王凤等,2013;张殿发等,2005),白云岩类的pH值为4.22~9.47,平均为7.59,砂砾岩类的pH值4.82~8.91,平均为7.24,花岗岩类的pH值为4.42~9.58,平均为6.45,流纹岩类的pH值为4.39~8.56,平均为6.30,pH值大小为流纹岩类<花岗岩类<砂砾岩类<白云岩类,土壤pH越大会限制弱酸溶性磷化合物的分解,导

致土壤速效磷含量的降低。

K、Ca、Fe是植物生长的必须营养元素,其主要输入途径为矿物风化释放,不同地质建造中矿物成分含量不同,导致土壤中含量差别较大。白云岩建造区主要是富含钙镁成分的白云石, CaO含量为0.54%~27.59%,平均为4.43%,远高于其他建造区土壤含量的2倍左右,可说明白云岩建造区分布大量喜钙的侧柏乔木的原因。白云岩建造区SOM、N、S含量高,主要是白云岩中钙、镁与植物分解产生的有机酸结合形成不易溶解淋失腐质钙镁盐类(杨继镒等,1997),导致有机质(SOM)含量较高,有机质(SOM)含量0.34%~28.77%,平均为4.43%。有机质SOM增加,利于土壤胶体吸附N、S能力提升,导致白云岩建造区土壤中N、S含量增加,进一步解释了白云岩建造区喜钙的浅根性灌丛植物分布的原因。

#### 4.3 地质建造结构裂隙影响水分供给

在北方干旱以及半干旱地区,植被生长所需要的水分主要来自降水,而天然降水的利用效率又取决于土壤及风化层对于雨水的拦蓄、保持能力和植被对土壤水分的利用程度,其中植被对水分的利用程度受根系的垂直和水平分布特征影响,浅层和深层根系的相对分布及其活性,影响着植物水分的吸收范围(韩烈保等,2009)。不同的地质建造对水分的保蓄能力和植被根系的分布特征共同影响植物群落的组成。

在花岗岩建造区风化壳厚度较大,包括石英等不易风化的粗颗粒级矿物成分和长石、云母等风化形成的各类细粒级的次生黏土矿物,降雨后,地表径流量少,水分保持能力较强(Zhang et al.,2017)。此外花岗岩类节理裂隙张开性好,含水性和导水性较好(郭永海,2012),下伏的基岩坚实不渗漏,保水性良好,可以提供深根系和浅根系植被的不同深度水分供给,满足了建造区内森林为主的植物生长需求。在流纹岩建造区岩石风化能力较弱,贯通性的裂隙发育,大气降水沿裂隙到达深层的水分难以蒸发,利于放射状根系植物生长水分需求。白云岩建造区风化层较薄,基岩层发育大量的贯通式密闭型和开张型节理裂隙,大气降水会快速下渗,在密闭型裂隙中存储,在半张开性裂隙中快速渗漏,尤其是岩层产状陡倾的区域,保蓄水能力较差,仅可供

给根系发达的灌丛吸收裂隙深层水,无法满足乔木类植被生长。砂砾岩区风化程度较强,主要以不易风化的石英粗粒级矿物成分为主,易被侵蚀,岩层产状水平,保蓄水能力一般,相应的岩层呈倾斜或者陡立产状的,则保蓄水能力极差,地表径流量增大,水分保持能力减弱,因此,该区域浅层土壤水仅满足耐旱的灌丛生长。

## 5 结 论

(1)花岗岩建造区土壤层和风化层厚度大,基岩发育张开型非贯通裂隙,土壤中P、K、Fe元素含量高,以酸性土壤为主,保蓄水性能良好,形成以马尾松等垂直状深根、喜酸乔木森林为主的植物群落,植被覆盖度高。

(2)流纹岩建造区土壤层和风化层较薄,基岩发育张开型贯通裂隙,土壤中P含量高,保蓄水性能一般,形成以灌木为主,部分辐射状浅根油松乔木森林为辅的植被群落,植被覆盖度中等。

(3)白云岩建造区土壤层和风化层薄,基岩多发育紧闭性贯通裂隙,土壤中的Ca含量较高,保蓄水性能差,形成以串联状、辐射状灌丛为主,少量扁平状浅根性、喜钙的乔木的植物群落,植被覆盖度最高。

(4)砂砾岩建造区土壤层最薄,水土流失严重,保蓄水性能最差,形成了以荆条为主的辐射状、须根状耐旱灌丛植物群落,植被覆盖度最低。

## References

- Abuel-Naga H, Bouazza A. 2010. A novel laboratory technique to determine the water retention curve of geosynthetic clay liners[J]. *Geosynthetics International*, 17(5): 313–322.
- Brady K U, Kruckeberg A R, Bradshaw Jr H D. 2005. Evolutionary ecology of plant adaptation to serpentine soils(Review)[J]. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 36: 243–266.
- Fernando Valladares, Cristina C Bastias, Oscar Godoy, Elena Granda, Adrián Escudero. 2015. Species coexistence in a changing world[J]. *Frontiers in Plant Science*, 6: 1–16.
- Gamfeldt Lars, Hillebrand Helmut, Jonsson Pe R. 2008. Multiple functions increase the importance of biodiversity for overall ecosystem functioning[J]. *Ecology*, 89(5): 1223–1231.
- Geological Dictionary Office of the Ministry of Geology and Mineral Resources. 2005. *Geological Dictionary* [M]. Beijing: Geological

- Publishing House(in Chinese).
- Gong Jinzhong, Liu Jianbo, Liu Junzhang, Guo Jisong. 2006. An ecological geochemical model for Jingdong chestnut [J]. Chinese Geophysical and Geochemical Exploration,30(2):108–110(in Chinese with English abstract).
- Guan Xiuyu, Guo Jie, Chen Haiyan, Zhang Yunqiang. 2018. Discovery of stromatolites from the Ordovician Yeli Formation and its sedimentary environment in Chengde Basin, Hebei Province [J]. Advances in Earth Science,33(5):545–554 (in Chinese with English abstract).
- Guo Yonghai, Wang Hailong, Dong Jiannan, Su Rui, Ji Ruili, Liu Shufen, Li Yawei, Zong Zihua. 2012. Distribution and enrichment regularity of weathering fracture water in Beishan area [J]. World Nuclear Geoscience, 29(4):222–226 (in Chinese with English abstract).
- Guo Zhenjie, Yin Jin, Zhang Lijun, Chen Feng, Hou Xiaodong. 2008. Effect of different altitude on biomass and rhizomatous morphological plasticity of *Leymus chinensis* [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment,22 (4):175–180 (in Chinese with English abstract).
- Hahn W. Jesse, Riebe Clifford S., Lukens Claire E., Araki Sayaka. 2014. Bedrock composition regulates mountain ecosystems and landscape evolution[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 111(9): 3338–3343.
- Han Liebao, Wang Qiong, Wang Xiaobei, Gu Zaiyuan, Du Yongji, Song Guilong. 2009. Researches on root distribution on different sites condition [J]. Journal of Basic Science and Engineering,17(2): 231–237 (in Chinese with English abstract).
- Huang Jianjun. 2015. Study on the coupling relation between eco-environment and geotectonic[J]. Journal of Earth Environment, 6 (4):231–237 (in Chinese with English abstract).
- J Canadell, R B Jackson, J B Ehleringer, H A Mooney, O E Sala, E-D Schulze.1996. Maximum rooting depth of vegetation types at the global scale[J]. Oecologia, 108(4): 583–595.
- Ji Xiaolei, Yang Ping. 2012. The effects of roots angles of *nerium indicum* on the stability of slopes[J]. Ecology and Environmental Sciences, 21(12):1966–1970 (in Chinese with English abstract).
- Kennedy Theodore A, Naeem Shahid, Howe Katherine M, Knops Johannes M H. 2002. Biodiversity as a barrier to ecological invasion[J]. Nature, 417(6889): 636–638.
- Li Miaomiao. 2003. The Method of Vegetation Fraction Estimation by Remote Sensing[D]. Graduate School of Chinese Academy of Sciences (Institute of Remote Sensing Applications) (in Chinese with English abstract).
- Li Yangbing, Hou Jianun, Xie Deti. 2002. The recent development of research on karst ecology in southwest China [J].Scientia Geographica Sinica, 22(3): 365–370 (in Chinese with English abstract).
- Li Zhenji, Chen Xiaolin, Zheng Hailei. 2014. Ecology (Fourth Edition)[M]. Beijing: Science Press, 1–20 (in Chinese with English abstract).
- Liu Yuan, Huang Bo, Cheng Tao, Qu Lean. 2012. Vegetation coverage in upper Huaihe River Basin based on binary pixel model of remote sensing [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation,32 (1): 93–97 (in Chinese with English abstract).
- Liu Yuanyuan, Wu Peipei, Yang Leibin, Wang Limin. 2018. Analysis of the climate characteristics of thunderstorms in Chengde from 1973 to 2012 [J]. Meteorology Journal of Inner Mongolia, (4):15–17 (in Chinese with English abstract).
- Long Hanli, Qin Zhigang, Liu Fuyun, Wei Zonghua, Gan Shaoxiong, Pu Chunlin, You Jiyong. 2013. Advances in researches on vegetation restoration in dry valleys of Sichuan Province [J]. Journal of Sichuan Forestry Science and Technology, 34(6):27–32 (in Chinese with English abstract).
- Lu Honghai. 2013. Landscape characteristics and comparison of five rock modeling landforms in China [J].Geography Teaching, (10):4–7 (in Chinese with English abstract).
- Morford Scott L, Houlton Benjamin Z, Dahlgren Randy A . 2011. Increased forest ecosystem carbon and nitrogen storage from nitrogen rich bedrock.[J].Nature, 477(7362): 78–81.
- Qiu Yang, Zhang Jintun. 2000. The ordination axes clustering based on detrended canonical correspondence analysis ordination and its application to the analysis of the ecological gradients of plant communities [J].Acta Ecologica Sinica, 20(2):199–206 (in Chinese with English abstract).
- Richter Daniel deB, Billings Sharon A. 2015. 'One physical system': Tansley's ecosystem as Earth's critical zone(Review) [J].New Phytologist, 206(3): 900–912.
- Stephenson, Nathan Lee. 1988. Climatic Control of Vegetation Distribution: The Role of the Water Balance with Examples from North America and Sequoia National Park, California[D]. New York, US: Cornell University.
- Sun Xiangyang.2005. Pedology [M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 21–40.
- Tian Haifeng, Liu Huamin, Wang Wei, Wang Lixin, Liang Cunzhu. 2014. The distribution patterns of biodiversity and environmental interpretation in Daqingshan Mountain [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 28(8):172–176 (in Chinese with English abstract).
- Wang Feng, Zhu Yan, Chen Si, Zhang Keqiang, Bai Hongling, Yao Hu. 2013. Effect of freeze–thaw cycles on available nitrogen and phosphorus, enzymatic activities of typical cultivate d soil[J].

- Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 29 (24):118–123(in Chinese with English abstract).
- Yang Jigao, Wang Guoxiang. 1997. Taihang Mountain is suitable for land and trees[J]. Forest Resources Management, (1):19–26(in Chinese with English abstract).
- Zhang C, Qi X, Wang K, Zhang M, Yue Y. 2017. The application of geospatial techniques in monitoring karst vegetation recovery in southwest China: A review[J]. Progress in Physical Geography, 41 (4): 450–477.
- Zhang Dianfa, Zheng Qihong. 2005. Simulation of Water– salt Movement Law Under the Freeze–thawing Condition [J]. Progress in Geography, 24(4):46–55 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Libin, Wang Yinxiao. 2014. Forest Germplasm Resources in Hebei Province[M]. Beijing: China Forestry Publishing House(in Chinese).
- Zhang Xueling, Zhang Ying, Niu Dekui, Zhang Wenyuan, Li Zhe, Li Zhenzhen, Guo Xiaomin. 2018. Spatial– temporal dynamics of upland meadow coverage on Wugong Mountain based on TM NDVI [J]. Acta Ecologica Sinica, (7):2414–2424(in Chinese with English abstract).
- Zhang Yuqing, Qi Shi, Wen Miaoxia. 2003. Primary study on root system foraging space and rooting pattern of plants on the terrace embankments[J]. Science of Soil and Water Conservation, 1(3): 31–36(in Chinese with English abstract).
- Zhang Yunqiang, Chen Haiyan, Wei Wentong, Chen Chao, Liu Yinglong, Zhang Liguang, Zhu Zhipan. 2014. The tuffs from the Jiulongshan Formation in the Chengde Basin, northern Hebei: LA–ICP–MS zircon U–Pb age dating and its geological implications[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, (3):31–36(in Chinese with English abstract).
- Zhou Lili, Ma Shiwei, Mi Caihong, Li Jingnan. 2017. Soil moisture and available phosphorus vertical movement law under the freezing and thawing condition[J]. Research of Soil and Water Conservation, 24(3):70–74 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Jingfang, Xing Bailing, Ju Weimin, Zhu gaolong, Liu Yibo 2011. Remote– sensing estimation of grassland vegetation coverage in Inner Mongolia, China [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 35(6): 615–622(in Chinese with English abstract).
2012. 北山地区风化裂隙水分布特征和富集规律[J]. 世界核地质科学, 29(4):222–226.
- 国振杰, 易津, 张力君, 陈锋, 侯晓东. 2008. 海拔高度对羊草生物量和根茎形态可塑性的影响[J]. 干旱区资源与环境, 22(4):175–180.
- 韩烈保, 王琼, 王晓蓓, 辜再元, 杜永吉, 宋桂龙. 2009. 不同立地条件下荆条根系分布规律[J]. 应用基础与工程科学学报, 17(2):231–237.
- 黄建军. 2015. 生态环境与地质构造的耦合关系研究[J]. 地球环境学报, 6(4):231–237.
- 嵇晓雷, 杨平. 2012. 夹竹桃根系分枝角度对边坡稳定性影响[J]. 生态环境学报, 21(12):1966–1970.
- 李苗苗. 2003. 植被覆盖度的遥感估算方法研究[D]. 中国科学院研究生院(遥感应用研究所).
- 李阳兵, 侯建筠, 谢德体. 2002. 中国西南岩溶生态研究进展[J]. 地理科学, 22(3):365–370.
- 刘玉安, 黄波, 程涛, 曲乐安. 2012. 基于像元二分模型的淮河流域上游植被覆盖度遥感研究[J]. 水土保持通报, 32 (1):93–97.
- 刘园园, 吴裴裴, 杨雷斌, 王丽敏. 2018. 1973—2012年承德市雷暴气候特征分析[J]. 内蒙古气象, (4):15–17.
- 龙汉利, 覃志刚, 刘福云, 魏宗华, 干少雄, 蒲春林, 尤继勇. 2013. 四川干旱河谷地区植被恢复研究进展[J]. 四川林业科技, 34(6):27–32.
- 路洪海. 2013. 我国五大岩石造型地貌景观特征及对比[J]. 地理教学, (10):4–7.
- 李振基, 陈小麟, 郑海霞. 2014. 生态学[M]. 北京: 科学出版社, 1–20.
- 邱扬, 张金屯. 2000. DCCA 排序轴分类及其在关帝山八水沟植物群落生态梯度分析中的应用[J]. 生态学报, 20(2):199–206.
- 孙向阳. 2005. 土壤学[M]. 北京: 中国林业出版社.
- 田海芬, 刘华民, 王伟, 王立新, 梁存柱. 2014. 大青山山地植物区系及生物多样性研究[J]. 干旱区资源与环境, 28(8):172–176
- 王风, 朱岩, 陈思, 张克强, 白鸿玲, 姚虎. 2013. 冻融循环对典型地带土壤速效氮磷及酶活性的影响[J]. 农业工程学报, 29(24):118–123.
- 杨继镐, 王国祥. 1997. 太行山适地适树[J]. 林业资源管理, (1):19–26.
- 张殿发, 郑琦宏. 2005. 冻融条件下土壤中水盐运移规律模拟研究[J]. 地理科学进展, 24(4):46–55.
- 张立彬, 王印肖. 2014. 河北林木种质资源[M]. 北京: 中国林业出版社.
- 张学玲, 张莹, 牛德奎, 张文元, 李志, 李真真, 张晓敏. 2018. 基于 TM NDVI 的武功山山地草甸植被覆盖度时空变化研究[J]. 生态学报, 38(7):2414–2424.
- 张宇清, 齐实, 文妙霞. 2018. 梯田埂坎植物根系营养空间及伸展模式初步研究[J]. 中国水土保持科学, 1(3):31–36.
- 张运强, 陈海燕, 魏文通, 陈超, 刘应龙, 张立国, 朱志攀. 2014. 冀北承德盆地九龙山组凝灰岩夹层 LA–ICP–MS 锆石 U–Pb 定年及其地质意义[J]. 沉积与特提斯地质, 34(3):88–95.
- 周丽丽, 马世伟, 米彩红, 李婧楠. 2017. 冻融条件下土壤水分和速效磷垂直迁移规律[J]. 水土保持研究, 24(3):70–74.
- 朱敬芳, 邢白灵, 居为民, 朱高龙, 刘艺博. 2011. 内蒙古草原植被覆盖度遥感估算[J]. 植物生态学报, 35(6):615–622.

## 附中文参考文献

- 地质矿产部地质辞典办公室. 2005. 地质大辞典[M]. 北京: 地质出版社.
- 官进忠, 刘剑波, 刘俊长, 郭继颂. 2006. 京东板栗生态地球化学模式[J]. 物探与化探, 30(2):108–110.
- 关秀宇, 郭杰, 陈海燕, 修迪, 张运强. 2018. 冀北承德盆地奥陶纪冶里组叠层石的发现及沉积环境[J]. 地球科学进展, 33(5):545–554.
- 郭永海, 王海龙, 董建楠, 苏锐, 季瑞利, 刘淑芬, 李亚伟, 宗自华.