

中国烧变岩地貌的类型、特征与开发分析^{*}时志强¹ 黄俊杰¹ 董 燕¹ 冯常娟² 陈 彬²

1 成都理工大学沉积地质研究院, 四川成都 610059

2 聊城大学地理与环境学院, 山东聊城 252000

摘 要 在中国北方、西部主要沉积盆地的边缘地区常见煤层自燃形成的烧变岩, 从而形成特殊的烧变岩地貌, 其分布广泛, 常色彩艳丽, 具矿产价值和科研价值, 但前人研究涉及较少, 对其旅游价值的开发也极为忽视。在多个露头剖面实地调查的基础上, 本次研究依据煤层自燃过程、烧变岩空间分布及颜色、地貌成因, 将烧变岩地貌划分为烧变丘陵地貌 (包括红色烧变丘陵、彩色烧变丘陵地貌和烧变岩披覆山顶地貌)、烧变侵蚀地貌 (包括烧变岩沟谷地貌、烧变岩陡崖地貌)、塌陷地貌和黄土覆盖 (烧变岩) 地貌。其中烧变丘陵地貌和烧变侵蚀地貌是常见的烧变岩地貌, 而塌陷地貌主要存在于地腹煤层正在燃烧的地域, 黄土覆盖烧变岩地貌是第四纪黄土覆盖烧变岩 (烧变岩零星出露或被完全覆盖) 形成的特殊地貌。各类烧变岩地貌的形成主要受控于煤层厚度、产状、构造变动、河流溯源侵蚀、古气候等多种条件。烧变岩地貌具有明显的科学价值和旅游开发价值, 应予关注。

关键词 煤层自燃 烧变岩 地貌 旅游景观

第一作者简介 时志强, 男, 1972 年生, 成都理工大学教授, 主要从事沉积学研究工作。E-mail: szqcdut@163.com。

中图分类号: P931.5 文献标志码: A

Geomorphological types and characteristics of burnt rocks
in China and their exploitation analysisSHI Zhiqiang¹ HUANG Junjie¹ DONG Yan¹ FENG Changjuan² CHEN Bin²

1 Institute of Sedimentary Geology, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

2 School of Geography and Environment, Liaocheng University, Shandong Liaocheng 252000, China

Abstract In the margins of the major sedimentary basins in northern and western China, burnt rocks formed from the spontaneous combustion of coal seams are commonly found, resulting in special burnt rock landform. This landform is widely distributed in China, commonly with bright colore. However, its scientific and tourist values have been hardly focused on in literature. Few studies have involved the tourism development of such burnt rock landforms in China. Based on field investigations of outcrop sections, this study classifies these landforms into: burnt hilly landforms (including burnt red hilly landform, burnt colorful hilly landform and peak-covered landform of burnt rocks), erosional landform of burnt rocks (including gully landform, steep cliff landforms), collapse landform and loess-covering burnt rock landform according to the process of coal spontaneous combustion, landform genesis, spatial distribution

谨以此文纪念冯增昭先生 100 周年诞辰。

^{*} 国家自然科学基金项目 (编号: 42201006) 资助。[Financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 42201006)]

收稿日期: 2025-12-05 改回日期: 2026-06-19

and color of the burnt rocks. Among them, hilly and erosional landforms are commonly seen, while collapse landform mainly exists in areas where underground coal seams are burning. Loess-covering burnt rock landform formed with the Quaternary loess covering the burnt rocks. The formation of various burnt rock landforms is mainly controlled by such factors as coal seam thickness, stratum occurrence, tectonic movement, river erosion and paleoclimate. Burnt rock landforms should be given more attention due to its scientific value and tourism exploitation value. These burnt rock landforms have significant scientific and tourism development values and deserve appropriate attention.

Key words coal spontaneous combustion, burnt rock, landform, tourism landscape

About the first author SHI Zhiqiang, born in 1972, a professor at Chengdu University of Technology, is mainly engaged in research on sedimentology. E-mail: szqedut@163.com.

新生代以来相对强烈的构造变动 (Manabe and Broccoli, 1990; 李吉均等, 2001) 使中国中北部、西北地区多个沉积盆地边缘含煤地层暴露、遭受风化侵蚀。而上新世晚期以来, 中国西北部地区长期处于相对干旱的气候条件下 (安芷生等, 2015), 出露的晚古生代或中生代煤层发生自燃, 在鄂尔多斯、准噶尔、伊犁、塔里木等沉积盆地的边缘地区 (图 1) 形成一种特殊的热变质岩或受其影响的沉积岩—烧变岩。在野外可见煤层本身燃烧后形成的煤灰较疏松、硬度低, 但是自燃煤层上方被烧熔、受炙烤而形成的烧变岩固结程度大, 较未经煤层自燃影响的碎屑岩, 其硬度明显增加, 抗风化能力增强。在风化作用及大气降水/河流侵蚀作用下可形成陡崖、山顶披覆、塌陷等特殊地貌, 也可形成低矮丘陵地貌。烧变岩多呈现红、褐色调, 亦可见白、绿、黄、黑、钢灰等多种颜色, 并由此形成特殊的地貌景观。这类成因特殊的热变质岩常表现为红层地貌, 在某些地区 (如准噶尔盆地东缘吉木萨尔县火烧山地区), 其艳丽的红色丘陵地貌作为旅游景点吸引了大量游客, 但其成因明显不同于主要形成于红色碎屑岩体系的丹霞地貌。此类主要由烧变岩形成的地貌景观, 作者称之为烧变岩地貌, 在中国分布较为广泛, 本次研究认为其与丹霞地貌一样具备潜在的科普价值及旅游景观意义, 其本身也蕴含着丰富的古气候、古构造、古地貌等地质学信息 (时志强等, 2021), 科学研究意义明显, 但相关研究匮乏, 目前研究者对于中国烧变岩地貌学的认识近乎为空白, 对其分类、特征及景观地貌开发没有清晰的认识, 阻碍着相关领域科学进展和旅游潜力发掘。

1 烧变岩地貌的概念与岩石构成

1.1 概念

在中国中北部及西北部, 烧变岩广泛见于煤系地层露头区, 如在鄂尔多斯盆地东北缘 (陕北、晋西北、内蒙南部等地)、吐哈盆地西缘 (新疆)、准噶尔盆地东缘 (新疆)、天山南北缘 (新疆)、祁连山前 (新疆东南部、青海西北) 等构造抬升显著致使煤层出露的地区 (图 1), 在西藏、甘肃、宁夏等省区的小型含煤盆地中亦有发现, 形成一种在含煤岩系沉积岩分布区存在的特殊的变质岩地貌单元或与之有关的地貌单元, 即为烧变岩地貌。在侏罗系—白垩系煤层出露地区, 包括地质历史时期 (主要为新生代晚期) 曾暴露的地区 (如现为黄土覆盖地区), 一般可见烧变岩。在鄂尔多斯盆地东北部边缘地区, 除侏罗系煤层, 石炭系—二叠系煤层的出露、自燃也促进烧变岩地貌的形成, 其主要发育在黄河及其支流流经的区域。

烧变岩地貌包括了一切和煤层自燃有关的地貌景观, 是煤层自燃后的多种热变质岩、低温烘烤岩等形成的多种颜色、多种形态的地貌景观。其不但指地质历史时期被侵蚀后暴露或浅埋藏煤层自燃后形成的烧变岩经风化、剥蚀后形成的地貌, 也包括目前没有明显暴露的地腹煤层正在燃烧的地域存在的地表地貌。受煤层厚度、分布范围、出露情况的制约, 煤层自燃对上覆及周边沉积岩的影响可大可小, 颜色也不限于红色岩石, 还可以呈现黑色、钢灰色、紫色、黄色、白色、斑驳的杂色等多种颜色混杂的颜色, 其形成各色丘陵及与烧变岩有关的陡崖、沟谷等各种地貌景观。

1.2 岩石构成

组成该类地貌的岩石主要为烧变岩, 该类岩石

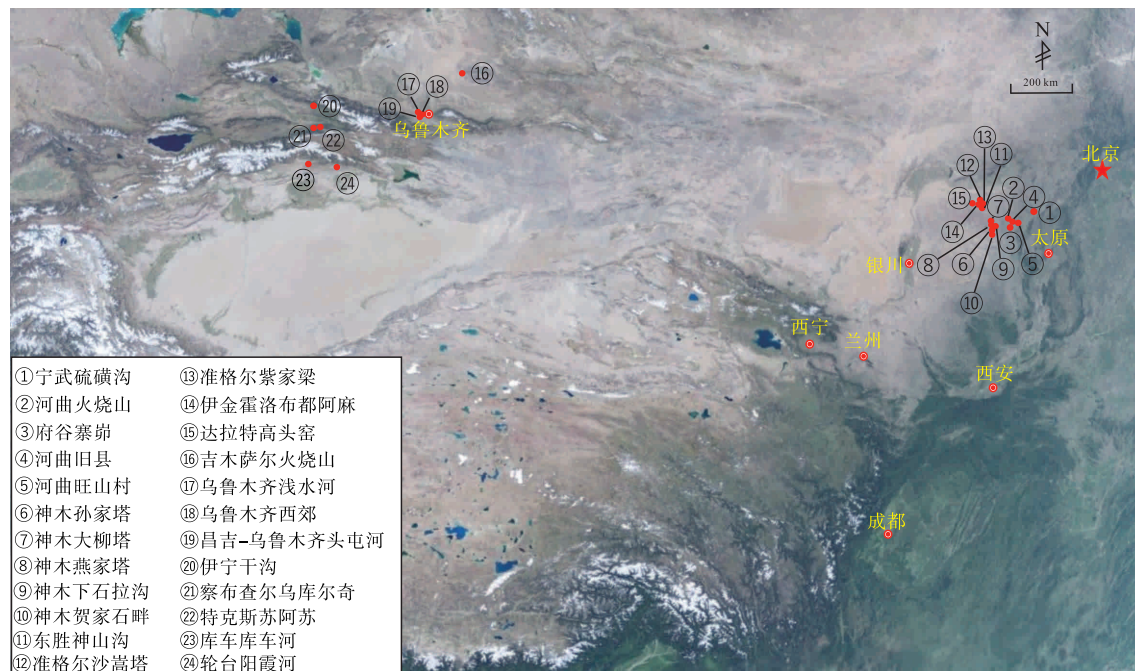


图 1 本研究涉及的中国烧变岩研究剖面

Fig. 1 Distribution of burnt rock sections in China in this study

是煤层自燃产生的高温导致围岩烘烤变质而形成的一种特殊的变质岩，又被称为燃烧变质岩（Hefern and Coates, 2004; Stracher *et al.*, 2015）。高温变质过程会导致沉积岩脱水和氧化，引起岩石学、矿物学和地球化学性质的改变（Kuenzer and Stracher, 2012）。在地史时期，覆盖在燃烧煤层之上的沉积岩会在时间和空间上经历一系列的变化：首先遭受赤铁矿或氢氧化铁形式的铁氧化作用而硬化；随着温度的增加，黄色变成更暗、更强烈的橙色和红色，这取决于温度和氧气供应；在高温作用下，岩石会被烧结、再结晶或熔化，形成陶瓷结构、烧熔结构。

依据燃烧变质程度不同，烧变岩可识别为烧熔岩、烧结岩、烧烤岩和烘烤岩（黄雷，2008; Grapes *et al.*, 2011; 陈彬，2021）：（1）烧熔岩：原岩因煤的燃烧而高温熔化后快速冷凝形成的一种变质岩，主要呈现黑色、钢灰色或暗红色，具有明显的玻璃质流动构造和迅速冷凝的外观，具金属光泽（图 2-a）。为厚煤层大规模剧烈自燃所致，通常位于厚层烧变岩的底部，燃烧煤层之上。（2）烧结岩：原岩发生轻微塑变，但未完全发生熔融（图 2-b, 2-c）。岩石多呈现不同色调的红色，沉积岩结构和构造改变很大，部分保留了原岩的特征，质地坚硬，呈现角砾状、陶瓷状或板片状构

造。（3）烧烤岩：热变质程度进一步降低，呈现浅红色或砖红色（图 2-d, 2-e），硬度一般较大，层理清晰，沉积岩结构和构造未明显改变，常保留结构清晰、但呈现红色色调的植物痕迹。（4）烘烤岩：热变质程度最低，距离煤层燃烧中心最远或位于煤层阴燃处附近。颜色略微发生改变，主要为浅黄色、淡褐色或灰白色（图 2-f），结构和构造未发生改变，裂隙相对增加，与正常围岩过渡。近年来的研究显示，烧变岩区域分布的白色砂岩很可能是一种特殊的烘烤岩（董燕等，2024）。从野外地质实际观察，从烘烤岩到烧烤岩、烧结岩再到烧熔岩，岩石变质程度增加，其硬度也显著增加：烘烤岩和原岩硬度类似，烧烤岩和烧结岩硬度显著增加，抗风化能力显著增强；烧熔岩硬度更大，但在烧变岩中占比较少，仅分布在厚度较大的自燃煤层（煤灰）附近。

煤层自燃所致的围岩热变质作用过程，亦是岩石高温熔融、水分蒸发、有机质转化成 CO_2 而释放、鳞石英、铁堇青石、莫来石等新矿物形成的过程（Baboolal *et al.*, 2018; Zhang *et al.*, 2020），在此过程中岩石进一步固结，颜色因氧气供给充足与否而变化。煤层自燃过程中或之后，常见方解石（图 2-g, 2-h）或石膏（准噶尔盆地东缘）充填裂隙。此外，较薄煤层燃烧后会保留煤灰



a—烧熔岩, 准噶尔盆地南缘头屯河西剖面; b—烧结岩, 塔里木盆地北缘库车河剖面; c—烧结岩, 伊犁盆地北缘伊宁干沟剖面; d—被黄土覆盖的烧熔岩, 鄂尔多斯盆地东北缘神木大柳塔剖面; e—烧烤岩, 伊犁盆地南缘察布查尔乌库尔奇剖面; f—烘烤岩, 准噶尔盆地南缘头屯河东剖面; g—烧烤角砾岩中较普遍的方解石脉, 鄂尔多斯盆地东北缘神木孙家塔剖面; h—烧结角砾岩中较普遍的方解石脉, 准噶尔盆地南缘浅水河剖面; i—薄煤层自燃引起小范围烧变作用, 鄂尔多斯盆地东北缘神木贺家石畔剖面

图 2 组成烧变岩地貌岩石的宏观特征

Fig. 2 Macrofeatures of constituent rocks causing burnt rock landforms

(图 2-i), 且上覆岩层热变质范围小, 一般不形成烧熔岩和烧结岩。因薄煤层的燃烧形成的烧变岩规模小, 影响范围有限(图 2-i), 难以形成宏观上的地貌景观, 故本研究关注较少; 本次研究所述烧变岩地貌为大规模煤层自燃形成的宏观上大体积烧变岩分布的地区, 其形成大规模烧变岩, 相关的地貌景观更为显著。

2 烧变岩地貌分类及其特征

本次研究依据地貌学特点和烧变岩形成过程、空间分布、颜色等, 将烧变岩地貌划分为烧变丘陵地貌(进一步细分为红色烧变丘陵地貌、彩色烧变丘陵地貌和烧变岩披覆山顶地貌)、烧变侵蚀地貌(包括烧变岩沟谷地貌和烧变岩陡崖地貌)、塌

陷地貌和黄土覆盖(烧变岩)地貌。其中烧变丘陵地貌和烧变侵蚀地貌是常见的烧变岩地貌; 塌陷地貌主要存在于地腹煤层正在燃烧(或地腹煤火刚被人工扑灭不久之后)的区域, 其在地质历史时期广泛存在, 是烧变丘陵、烧变侵蚀等地貌形成的基础; 而黄土覆盖地貌是第四纪黄土覆盖烧变岩(烧变岩可在地势较高地区局部出露)形成的特殊地貌(表 1)。

2.1 烧变丘陵地貌

在构造活动相对较弱地区发育的烧变岩地貌, 含煤地层倾角一般较缓, 浅埋藏煤层常大面积出露、自燃造成的固结程度高的岩石被风化、剥蚀后常形成烧变丘陵地貌。如在鄂尔多斯盆地东北部和准噶尔盆地东缘, 构造活动以整体抬升为主, 常形

表 1 烧变岩地貌分类依据及其成因
Table 1 Classification criteria and origins of burnt rock landforms

地貌分类	分类依据		形成原因
	地貌特点	烧变岩特征	
烧变丘陵地貌	红色烧变丘陵地貌	红、紫色为主的丘陵	含煤地层倾角一般较缓,整体构造抬升导致煤层大面积出露,而后发生自燃,后烧变岩被风化、剥蚀后形成此种丘陵地貌
	彩色烧变丘陵地貌	红、褐、棕、白、钢灰、黑、绿、黄等多种色调混杂的丘陵	
	烧变岩披覆山顶地貌	前期已经形成的烧变岩披覆在陡峻的山顶之上	
烧变侵蚀地貌	烧变岩沟谷地貌	在下切侵蚀较浅的河谷两侧发育烧变岩	构造抬升活动显著,河流侵蚀影响显著。煤层自燃、河流侵蚀、河岸烧变岩垮塌相辅相成,共同造就了此种侵蚀地貌。
	烧变岩陡崖地貌	显著的陡崖地貌	
塌陷地貌	地腹煤层自燃造就的地表岩石破裂、沉降地貌	烧变岩正在形成	煤层自燃导致体积损失,不足以支撑上覆地层
黄土覆盖地貌	烧变岩被黄土覆盖地貌	烧变岩规模不一,仅局部出露	较早形成的烧变岩被第四纪黄土覆盖

成各色丘陵地貌。在伊犁、塔里木、宁武等盆地边缘含煤岩系倾角较缓的地区亦较为常见。

2.1.1 红色烧变丘陵地貌

为较厚煤层剧烈燃烧后形成的高温变质岩红层地貌,以准噶尔盆地东缘吉木萨尔县火烧山地区最为典型(图 3-a)。此类燃烧变质岩以鲜艳的红色为主,间杂褐、棕、黄等色调,远观呈现典型的红色丘陵地貌,主要由厚度大的烧结岩和烧烤岩组成。火烧山地区红色烧变丘陵地貌面积超过 15 km²,沿准噶尔盆地东缘主要公路发育,总体呈现出大面积分布的高温变质作用改造的岩石出露区,为国内罕见的鲜红色烧变岩集中连片分布区,其成因特殊,色彩鲜艳,极具旅游景观价值,已被旅游团队自发开发成驻足旅游景点。此地貌亦见于鄂尔多斯盆地东北部(图 3-b, 3-d, 3-f)、准噶尔盆地南缘(图 3-e)和伊犁盆地南缘等地,但其规模远小于火烧山地区。在氧气供给充分的情况下,较厚煤层剧烈自燃,上覆较厚的砂、泥岩被高温烧烤从而形成坚硬的高温变质岩(主要为烧烤岩),红色烧烤泥岩中常见微柱状节理(图 3-g)、方解石(图 2-g)或石膏晶簇和钙质结核(图 3-c)。

2.1.2 彩色烧变丘陵地貌

是最为常见的烧变岩地貌之一(图 4),除了红色丘陵中所见的红、褐、棕等色调外,亦见大量白、钢灰、黑、绿、黄等色调与之混杂,本次研究称之为彩色烧变丘陵地貌,组成该类地貌的岩石为

厚度不一且混杂分布的各类烧变岩。该类地貌景观大量见于宁武盆地(图 4-a)、鄂尔多斯盆地(图 4-b, 4-c)、准噶尔盆地(图 4-d, 4-e)、塔里木盆地(图 4-f, 4-g)和伊犁盆地(图 4-h, 4-i)边缘地区。煤层自燃过程中的氧气供给、变质程度、原岩成分等制约着烧变岩颜色,如烧熔岩多呈钢灰色或灰黑色,成分较纯净的黏土岩常在高温炙烤下形成白色瓷化泥岩,黑色页岩在烧变后仍呈现暗色,而氧气供给受限的烧变过程会形成较多绿色烧烤岩或烧结岩,这些都是烧变岩丘陵呈现彩色的原因。

2.1.3 烧变岩披覆山顶地貌

相较来说,该类型地貌较红色和彩色烧变丘陵地貌经历了更强的构造作用影响。在构造活动区,如在天山南北缘,新生代(特别是第四纪)强烈的山脉隆升作用(Molnar and Ghose, 2000; 张培震等, 2002; 逢立臣, 2023)使得河流下切侵蚀显著,前期已经形成的烧变岩披覆在陡峻的山顶之上,形成该类丘陵地貌(图 5-a 至 5-c)。烧变岩下伏的含煤岩系仅经历低温烘烤作用(图 5-c)或没有受到煤层自燃影响(图 5-a),固结程度较烧变岩低,更易于被风化、侵蚀,在构造活动区更易形成该类地貌景观(图 5-a 至 5-c),构成该地貌的烧变岩常见烧熔岩、烧烤岩、烘烤岩,因风化侵蚀作用而保留的烧变岩厚度变化大。形成此类地貌的煤层自燃时代一般较早,即早于河流低阶地发育的烧变岩形成时代(如 Chen *et al.*, 2022),之后河流下切侵蚀作用强烈,从而仅在山顶保留烧变岩,



a—典型的红色丘陵地貌，准噶尔盆地东缘火烧山地区；b—红色丘陵的断面特征，鄂尔多斯盆地东北缘准格尔沙蒿塔剖面；c—为b的局部放大，可见鲜艳红色烧烤岩中的钙质结核（箭头所指）；d—红色丘陵地貌，鄂尔多斯盆地东北缘伊金霍洛布都阿麻剖面；e—红色丘陵地貌，准噶尔盆地南缘头屯河西剖面；f—红色丘陵地貌，鄂尔多斯盆地东北缘神木下石拉沟剖面；g—为f的局部放大，见红色烧烤泥岩中的微柱状节理

图 3 红色烧变丘陵地貌特征

Fig. 3 Characteristics of burnt red hilly landform



a—（山西宁武盆地西缘）宁武硫磺沟剖面；b—准格尔紫家梁剖面；c—神木大柳塔剖面；d—乌鲁木齐浅水河剖面；e—乌鲁木齐头屯河东剖面；f—轮台阳霞河剖面；g—库车库车河剖面；h—（伊犁盆地南缘）察布查尔乌库尔奇剖面；i—（伊犁盆地北缘）伊宁干沟剖面

图 4 烧变彩色丘陵地貌特征

Fig. 4 Characteristics of burnt colorful hilly landform

形成山顶披覆地貌。在天山南北缘（即伊犁盆地南缘和北缘、准噶尔盆地南缘、塔里木盆地西北缘）较为常见。

2.2 烧变侵蚀地貌

相比与烧变岩有关的丘陵地貌，该类地貌景观显现更为明显的河流侵蚀影响。在造山带前或附近地区，构造抬升活动更为显著，山脉的隆升或含煤岩系区的急剧、整体抬升加剧了大气降水/河流侵蚀作用，使煤层的出露更为快速，促进了其自燃过程，因此在有含煤岩系分布的河流和沟谷的两侧常见烧变岩。前人的研究显示烧变岩的形成与河流侵蚀地貌演化有耦合关系，中新世以来西北地区的干旱气候（刘晓东等，2001；安芷生等，2015），促使煤层更易自燃。而煤层自燃过程中上覆岩层中的裂隙形成、垮塌，又加剧了河流侧向侵蚀，因此煤层自燃和河流侵蚀相辅相成，共同造就了烧变侵蚀地貌的形成。

2.2.1 烧变岩沟谷地貌

为河流侵蚀所致，通常在下切侵蚀较浅的河谷

两侧发育，形成时代较晚。在国内所见烧变岩沟谷地貌（图 5-e，5-f），一般为河流侵蚀使得煤层出露、与氧气接触引发自燃所致，罕见自燃后坚硬的烧变岩被河流侵蚀者。一般为河流溯源侵蚀初期发生煤层自燃所致，大致可分为 2 种情况：一是厚度不大的煤层完全自燃引起的烧变岩地貌（图 5-e，5-f），组成该类地貌的烧变岩常为烘烤岩，而烧熔岩和烧结岩一般厚度不大；二是地层倾角较缓的厚煤层上部被侵蚀出露而后自燃所致，常见烧结岩和烧烤岩，下伏为有机质成熟度较高的阴燃煤层，其进一步发育则下伏煤层进一步剧烈燃烧，在剥蚀作用影响下形成烧变岩陡崖地貌或烧变岩披覆山顶地貌。

2.2.2 烧变岩陡崖地貌

煤层、特别是厚煤层自燃会导致地表破裂、下沉及塌陷，形成剪状正断层（裂隙），偶见逆断层。如在神木大柳塔剖面，强烈的上覆地层垮塌亦造成邻近层的上涌，形成罕见的逆断层。在较为强



a—烧变岩披覆山顶地貌，昌吉头屯河西剖面；b，c—烧变岩披覆山顶地貌，特克斯苏阿苏沟剖面；d—塌陷地貌，东胜神山沟剖面；e，f—黄土覆盖地貌，e为河曲旺山村剖面，f为神木燕家塔剖面

图 5 烧变岩披覆山顶、塌陷及黄土覆盖地貌特征

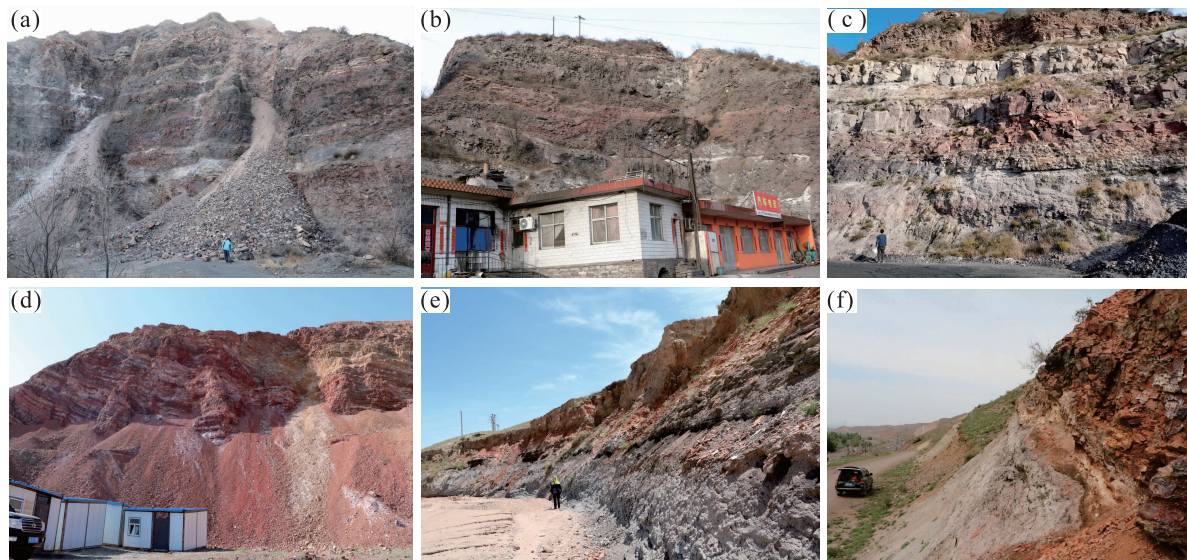
Fig. 5 Characteristics of peak-covered landform of burnt rocks, collapse landform and loess-covering burnt rock landform

烈的构造运动影响下，河流溯源侵蚀明显，造成烧变岩沿前期形成的裂隙大量垮塌，形成陡崖地貌。其一般沿下切河谷或急剧隆升的山脉山前带分布，如黄河河谷(图 6-a)及其支流(图 6-b, 6-c)，或隆升时代较新的天山山脉山前区(图 6-d)，组成该类地貌的烧变岩以烧结岩和烧烤岩为主，厚度大，颜色多样，且颜色多具层次感。需指出的是，烧变岩作为防火材料、陶瓷原料或建筑材料等进行开采时的人为活动亦可形成陡崖地貌，鉴于其色彩鲜艳而丰富，且也具有科学研究价值和旅游景观价

值，本次研究认为该类（人工）陡崖地貌也有开发价值。

2.3 塌陷地貌

常为地腹正在剧烈自燃的煤层分布区展现的烧变地貌景观，为典型的煤层自燃地貌，本次研究将其归为烧变岩地貌范畴，其主要表现为：(1) 地表基岩表面的破裂，形成裂缝、裂隙(图 5-d)、小型漏斗和（火焰、烟的）喷口等；(2) 地表基岩的沉降，形成天坑、壕沟、洼地和地表沉降等



a—黄河岸边的陡崖地貌，府谷寨峁剖面；b，c—石炭系—二叠系煤层自燃形成的烧变岩陡崖剖面，b 为河曲火烧山剖面，c 为河曲旧县剖面；d—侏罗系煤层自燃后的陡崖地貌，乌鲁木齐西郊剖面；e—河谷地貌，达拉特高头窑剖面；f—河谷地貌，（伊犁盆地南缘）特克斯苏阿苏村剖面

图 6 烧变岩陡崖和沟谷地貌特征

Fig. 6 Characteristics of cliff and valley landforms related to burnt rocks

(Kuenzer and Stracher, 2012)。塌陷地貌的形成和煤层自燃导致的体积损失有关，煤层及上覆岩层中的碳、硫物质以二氧化碳、一氧化碳、二氧化硫等气体形式大量释放，使得其不足以支撑上覆地层，进而造成塌陷，在地表形成裂缝、漏斗、天坑、沟壑等地貌景观。需指出的是，中国目前或现代地腹煤层的燃烧多受到人工开采的影响，其和自燃煤层的主要差别在于人工开采巷道加剧了空气（氧气）供给，但二者在地表形成的地貌景观是相似的。

2.4 黄土覆盖地貌

在鄂尔多斯盆地东北部、准噶尔盆地南缘等地，常见烧变岩被晚更新世马兰黄土覆盖现象（图 2-d；图 5-e，5-f），亦见于伊犁、准噶尔盆地边缘。显示煤层暴露和自燃后发生黄土沉积。在鄂尔多斯盆地边缘地区发育的烧变岩，尤其在陕北、内蒙南部，多被或厚或薄的黄土覆盖。

3 烧变岩地貌发育模式

3.1 煤层自燃条件

地腹煤层的燃烧会在一定程度上导致地表破裂、岩层下沉和围岩（特别是上覆岩层）性质改变，导致原始地貌景观发生变化、产生的新地貌

（Heffern and Coates, 2004；Kuenzer and Stracher, 2012；陈彬，2021）。上覆岩层的塌陷将形成大量裂缝，从而使更多的氧气与燃烧的煤层接触，促进煤层持续自燃。煤层自燃的控制因素主要包括煤自身的自燃倾向性，煤层厚度、产状以及外部环境条件等方面。

3.1.1 煤层本身的条件

煤的自燃倾向与其煤阶成反比，即低煤阶煤比高煤阶煤更容易发生自燃（Misra and Singh, 1994；Onifade and Genc, 2018）。在黄河沿岸，侏罗系（如延安组）煤层较石炭—二叠系（如太原组、山西组）煤层更易形成烧变岩，暴露的侏罗系煤层自燃更为彻底。黄铁矿的存在对煤层自燃起到催化作用（Wang *et al.*, 2003；Querol *et al.*, 2008）。煤层的厚度及产状影响煤层自燃的难易程度。厚煤层在氧化过程中产生的热量不易散失，煤层自燃的可能性增加（曹代勇等，2005）。换言之，薄煤层氧化过程中产生的热量会通过顶底板以传递方式散失，不利于热量的聚集及煤层的自燃（樊新杰等，2006）。此外，煤层倾角缓，在风化剥蚀后易于大面积暴露，造成暴露的或浅埋藏煤层与空气中氧气沟通更为通畅，并且煤层自燃后自燃易于沿倾向方向扩展（Misra and Singh, 1994；Onifade and Genc, 2018）。

3.1.2 外部条件

区域性构造抬升、河流侵蚀以及含煤岩系的风化剥蚀等地质条件对煤层自燃起到促进作用 (Misra and Singh, 1994; Heffern and Coates, 2004; Lohrer *et al.*, 2005)。构造运动产生的裂隙和断裂将为深部的煤层提供氧气, 增加煤与氧气接触面积, 促使煤层发生自燃 (Kaymakçi and Didari, 2002)。此外, 构造抬升、河流的侵蚀将煤层暴露于地表, 使煤层与空气中氧气接触, 为煤层自燃创造了有利条件。

地表水及地下水位对煤层自燃有一定的抑制作用, 潜水面以下的煤层不易自燃, 潜水面控制着煤层自燃的下限 (Heffern and Coates, 2004; Heffern *et al.*, 2007; 黄雷, 2008)。此外, 干旱气候有利于煤层自燃, 由于青藏高原的隆起对亚洲季风环流的阻挡作用, 中国西部第四纪干旱程度明显加重 (Guo *et al.*, 2008; Westaway, 2009), 也可能为煤层自燃提供了有利条件。

3.2 烧变岩地貌发育模式

本次研究涉及的烧变岩地貌, 包括地腹煤层自燃形成的地貌和烧变岩形成后再遭受风化、侵蚀后

形成的地貌。地腹煤层自燃形成的地貌如图 7-a 所示, 主要表现为塌陷地貌, 沿裂隙有火焰和烟雾冒出。塌陷的程度取决于地下煤层厚度和燃烧程度, 煤层厚度大且燃烧彻底则塌陷程度大, 此时常见烧熔岩和烧结岩、烧烤岩, 因垮塌而常形成角砾岩。阴燃的煤层可造成上覆岩层的烘烤, 此时热变质程度低, 塌陷程度小。厚度较薄的煤层自燃难以形成明显的塌陷。

当河流溯源侵蚀使得含煤岩系中煤层出露, 干旱一半干旱的气候条件促使煤层自燃, 则形成烧变岩沟谷地貌 (图 7-c)。在构造活动相对较弱、含煤地层倾角较缓的地区, 煤层自燃后形成烧变岩, 由于风化侵蚀作用而形成烧变丘陵地貌 (图 7-b)。推测厚而出露浅的煤层燃烧更为剧烈, 同时氧气供给充分, 则易形成红色烧变丘陵地貌, 其烧结岩、烧烤岩含量高, 岩石更为坚硬, 抗风化能力更强。而煤层埋深较大或厚度较薄的煤层, 自燃不甚充分或氧气供给不足, 烧变岩颜色多变, 且烘烤岩常见, 在后期的风化作用下易形成彩色烧变丘陵地貌。在鄂尔多斯、伊犁等盆地边缘, 烧变岩组成的

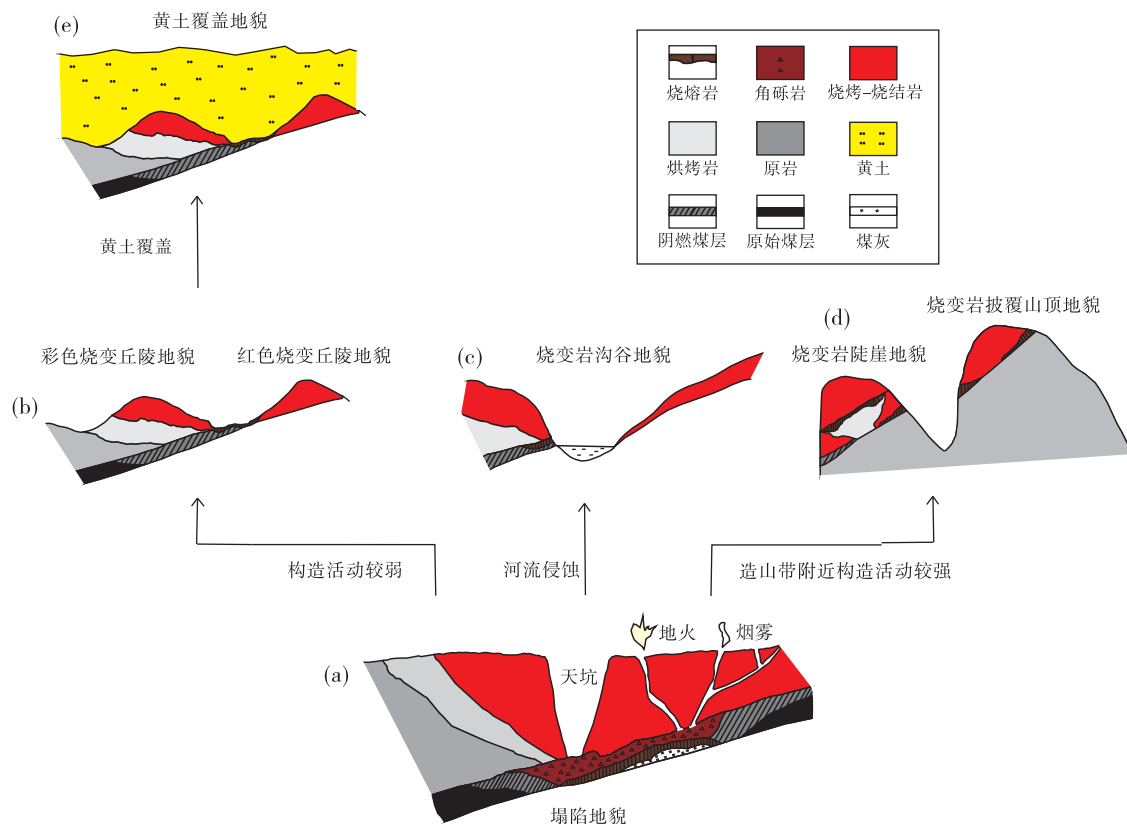


图 7 烧变岩地貌发育模式

Fig. 7 Developmental pattern of landforms related to burnt rocks

丘陵常被黄土覆盖，则形成黄土覆盖地貌（图7-e）。在构造活动较为强烈的地区，如天山造山带前缘，已经形成的烧变岩被强烈的河流侵蚀作用影响，则易形成烧变岩陡崖地貌和烧变岩披覆山顶地貌（图7-d）。

4 烧变岩地貌开发分析

4.1 科学价值开发

烧变岩本身具有矿产价值，烧变岩可用作陶瓷原料、耐火材料、铝质校正原料、园林观赏石和建筑材料（时志强等，2021）。在新疆吉木萨尔五工梁、乌鲁木齐西郊等多个地区烧变岩被开挖用作陶瓷原料或耐火材料；在陕北、内蒙南部，烧变岩常被开采用作建筑材料。需指出的是，采石场内被开挖的新鲜烧变岩色彩艳丽而丰富，具备科普价值和观赏价值。

在近年来的研究中，烧变岩的古构造、古地貌和古气候意义被广泛提及。烧变岩 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 测年结果可以显示间冰期旋回（Sokol *et al.*, 2014）或中亚地区的新构造运动（Novikov and Sokol, 2007）；烧变岩U-Th/He测年数据也记录了偏心率调制的太阳辐射变化对美国Powder River盆地景观演化速率的影响（Riihimaki *et al.*, 2009；Reiners *et al.*, 2011），也可用来约束河流下切和侧向回耗速率以及地形起伏的演变（Reiners *et al.*, 2011）。在中国西北地区，新生代青藏高原隆升的远程效应使得天山山脉隆升（张培震等，2002；逢立臣，2023）、黄河中游地区地堑系的伸展断陷（Li *et al.*, 1996；Lin *et al.*, 2001），促进了天山山前和鄂尔多斯盆地东北部边缘地区侏罗系煤层被剥蚀、暴露，青藏高原在新生代的急剧隆升也深刻影响着亚洲内陆干旱化过程及东亚季风系统变迁（Kutzbach *et al.*, 1993；An *et al.*, 2001），而干旱—半干旱气候有利于煤层自燃（Guo *et al.*, 2008；Westaway, 2009），这都有助于在煤层分布区形成普遍的烧变岩地貌。此外，黄河岸边及其支流流域烧变岩年龄也记录着黄河流域演化及晋陕河谷贯通的历史（陈彬，2021）。因此，中国的烧变岩地貌蕴含着丰富的构造隆升、河流侵蚀、古气候变化等地质信息，但由于相关研究较为滞后，目前对其科学价值的挖掘并不充分。

4.2 旅游价值开发

作为中国北部、西北部地区特殊而重要的一种地貌单元，烧变岩地貌一直未被人认识，遑论进一步的开发。在准噶尔盆地东缘火烧山、五彩湾一带，以红色丘陵、彩色丘陵为主的典型烧变岩地貌常引起赴北疆旅游的人们的好奇，常驻足观赏并感叹大自然的神奇。但由于未提出该类地貌的分类以及忽视其科研价值，该地区烧变岩地貌由于煤田工业开发和火力发电厂的建设而遭受大面积的破坏。由此来看，尽管具备旅游价值，但对烧变岩地貌的旅游开发极度不足，目前社会各界对该类地貌自然景观及其科学性的重视程度亟须加强。

作为中国北方、西北部一种独特的地貌单元，烧变岩地貌塑造了优美、奇特的自然景观，一些地方（如乌鲁木齐浅水河地区烧变岩采石场、吉木萨尔火烧山等地）的烧变岩分布广泛、五彩缤纷或鲜红满地，极具视觉冲击力，其美观程度不输丹霞地貌，毫无疑问是一种具有很高美学价值、旅游价值和科学价值的地貌类型，应当成为旅游资源开发和科学研究的重要对象。依据中国烧变岩零星的同位素年龄数据（业渝光等，1998；孙家齐等，2001；Novikov and Sokol, 2007；黄雷，2008；陈彬，2021）分析，更年轻的烧变岩其色彩更为艳丽，观赏价值更高。

参考中国丹霞地貌、彩色丘陵地貌以及美国烧变岩地貌的旅游价值开发经验，笔者建议中国烧变岩区的旅游价值以以下2种模式开发：一是直接开发，主要包括烧变岩地貌旅游景点的设置和烧变岩旅游纪念品开发；在美国中部，烧变岩常见于侏罗系煤层中（Heffern *et al.*, 2007；Riihimaki *et al.*, 2009；Reiners *et al.*, 2011），在一些州际公路旁常作为路途旅游景点供游客观赏，且在一些旅游点常见烧变岩制作的旅游纪念品正在售卖，这值得我们在今后的烧变岩旅游地貌开发中予以重视。二是间接开发，主要包括科普价值的宣传和科研意义开发，研究具旅游景观价值的烧变岩地貌的成因和形成过程，并进行科普宣传，用以提高普通人群的科学素养，培养年轻一代进行地质科学研究的兴趣。

5 结论

1) 依据地貌特点、煤层自燃过程、烧变岩空

间分布等,将烧变岩地貌划分为:(1)烧变丘陵地貌,进一步划分为红色烧变丘陵、彩色烧变丘陵地貌和烧变岩披覆山顶地貌;(2)烧变侵蚀地貌,可进一步细分为烧变岩沟谷地貌和烧变岩陡崖地貌;(3)塌陷地貌;(4)黄土覆盖(烧变岩)地貌。各类烧变岩地貌的形成主要受控于煤层厚度、产状、构造变动、河流溯源侵蚀等条件。

2)烧变丘陵地貌和烧变侵蚀地貌是常见的烧变岩地貌,而塌陷地貌主要存在于地腹煤层正在燃烧的地域,黄土覆盖地貌是第四纪黄土覆盖烧变岩(烧变岩或有局部外露)形成的特殊地貌。烧变岩地貌具明显的科学价值和旅游开发价值。

致谢 参加野外工作的还有王美玲、葛禹、杨小康、杜怡星等,感谢评审专家和编辑同志的意见和建议!

参考文献 (References)

- 安芷生, 吴国雄, 李建平, 孙有斌, 刘屹岷, 周卫健, 蔡演军, 段安民, 李力, 毛江玉, 程海, 石正国, 谭亮成, 晏宏, 敖红, 常宏, 冯娟. 2015. 全球季风动力学与气候变化. 地球环境学报, 6(6): 341-381. [An Z S, Wu G X, Li J P, Sun Y B, Liu Y M, Zhou W J, Cai Y J, Duan A M, Li L, Mao J Y, Cheng H, Shi Z G, Tan L C, Yan H, Ao H, Chang H, Feng J. 2015. Global monsoon dynamics and climate change. Journal of Earth Environment, 6(6): 341-381]
- 曹代勇, 樊新杰, 时孝磊, 吴查查, 魏迎春. 2005. 乌达煤田煤层自燃内因分析与自燃类型划分. 煤炭学报, 30(3): 288-292. [Cao D Y, Fan X J, Shi X L, Wu C C, Wei Y C. 2005. Analysis of spontaneous combustion internal factors and division of spontaneous combustion types of coal seam in Wuda coalfield, Inner Mongolia. Journal of China Coal Society, 30(3): 288-292]
- 陈彬. 2021. 中国西北地区侏罗系中烧变岩的特征、形成时代及地质意义. 成都理工大学博士学位论文. [Chen B. 2021. Characteristics, ages and geological significance of the Jurassic combustion metamorphic rocks in northwestern China. Doctoral dissertation of Chengdu University of Technology]
- 董燕, 王美玲, 陈彬, 时志强. 2024. 中国北方侏罗系烧变岩露头区白色砂岩特征与成因分析. 古地理学报, 26(6): 1325-1337. [Dong Y, Wang M L, Chen B, Shi Z Q. 2024. Characteristic and formation cause of white sandstones in the Jurassic outcrop area of burnt rocks in northern China. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 26(6): 1325-1337]
- 樊新杰, 曹代勇, 时孝磊, 吴查查. 2006. 内蒙古西部乌达矿区煤层自燃的控制因素. 地质通报, 25(4): 487-491. [Fan X J, Cao D Y, Shi X L, Wu C C. 2006. Controlling factors of spontaneous combustion of coal seams in the Wuda coalfield, western Inner Mongolia, China. Geological Bulletin of China, 25(4): 487-491]
- 逢立臣. 2023. 天山北麓晚第四纪构造变形的时空模式与机制研究. 华东师范大学博士学位论文: 1-65. [Feng L. 2023. Spatiotemporal patterns and geodynamic mechanism of late Quaternary deformation in the northern Chinese Tian Shan foreland. Doctoral dissertation of East China Normal University: 1-65]
- 黄雷. 2008. 鄂尔多斯盆地北部延安组烧变岩特征及其形成环境. 西北大学硕士学位论文: 1-56. [Huang L. 2008. Characters and Forming conditions of Burnt Rocks in Yan'an Formation of Northern Ordos Basin. Masteral dissertation of Northwest University: 1-56]
- 李吉均, 方小敏, 潘保田, 赵志军, 宋友桂. 2001. 新生代晚期青藏高原强烈隆起及其对周边环境的影响. 第四纪研究, 21(5): 381-391. [Li J J, Fang X M, Pan B T, Zhao Z J, Song Y G. 2001. Late Cenozoic intensive uplift of Qinghai-Xizang plateau and its impacts on environments in surrounding area. Quaternary Sciences, 21(5): 381-391]
- 刘晓东, 李力, 安芷生. 2001. 青藏高原隆升与欧亚内陆及北非的干旱化. 第四纪研究, 21(2): 114-122. [Liu X D, Li L, An Z S. 2001. Tibetan Plateau uplift and drying in Eurasian interior and northern Africa. Quaternary Sciences, 21(2): 114-122]
- 时志强, 王美玲, 陈彬. 2021. 中国北方烧变岩的分布、特征及研究意义. 古地理学报, 23(6): 1067-1081. [Shi Z Q, Wang M L, Chen B. 2021. Distribution, characteristics and significances of burnt rocks in northern China. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 23(6): 1067-1081]
- 孙家齐, 马瑞士, 舒良树. 2001. 新疆乌鲁木齐煤田自燃烧变岩岩石特征. 南京建筑工程学院学报, 59(4): 15-19. [Sun J Q, Ma R S, Shu L S. 2001. Petrologic characteristics of burnt rocks from coalfield selfcombustion at Urümqi, Xinjiang. Journal of Nanjing Architectural and Civil Engineering Institute (Natural Science), 59(4): 15-19]
- 业渝光, 邬象隆, 刁少波, 蒋炳南, 郑显华, 董视如. 1998. 塔里木盆地库车河烧变岩的形成年龄. 海洋地质与第四纪地质, 18(4): 115-119. [Ye Y G, Wu X L, Diao S B, Jiang B N, Zheng X H, Dong Y R. 1998. Formation ages of burned metamorphic rocks from the Kuqa river section Tarim basin. Marine Geology & Quaternary Geology, 18(4): 115-119]
- 张培震, 王琪, 马宗晋. 2002. 中国大陆现今构造运动的 GPS 速度场与活动地块. 地学前缘, 9(2): 430-441. [Zhang P Z, Wang Q, Ma Z J. 2002. GPS velocity field and active crustal blocks of contemporary tectonic deformation in continental China. Earth Science Frontiers, 9(2): 430-441]
- An Z S, Kutzbach J E, Prell W L, Porter S C. 2001. Evolution of Asian monsoons and phased uplift of the Himalaya-Tibetan Plateau since Late Miocene times. Nature, 411: 62-66.
- Baboolal A A, Knight J, Wilson B. 2018. Petrography and mineralogy of pyrometamorphic combustion metamorphic rocks associated with spontaneous oxidation of lignite seams of the Erin Formation, Trinidad. Journal of South American Earth Sciences, 82: 181-192.
- Chen B, Franceschi M, Wang Y, Duan X, Jin X, Shi Z. 2022. Late Cenozoic coal fires in the Liuhuanguo area (Xinjiang, northwestern China): ages, controlling factors and evolution. Russian Geology and Geophysics, 63: 636-648.
- Grapes R, Korzhova S, Sokol E, Seryotkin Y. 2011. Paragenesis of unusual Fe-cordierite (sekaninaite)-bearing paralava and clinker from the Kuznetsk coal basin, Siberia, Russia. Contributions to Mineralogy and Petrology, 162(2): 253-273.

- Guo Z T, Sun B, Zhang Z S, Peng S Z, Xiao G Q, Ge J Y, Hao Q Z, Qiao Y S, Liang M Y, Liu J F, Yin Q Z, Wei J J. 2008. A major reorganization of Asian climate by the early Miocene. *Climate of the Past*, 4(3): 153–174.
- Heffern E L, Coates D A. 2004. Geologic history of natural coal-bed fires, Powder River basin, USA. *International Journal of Coal Geology*, 59: 25–47.
- Heffern E L, Reiners P W, Naeser C W, Coates D A. 2007. Geochronology of clinker and implications for evolution of the Powder River Basin landscape, Wyoming and *Montana*. In: Stracher G B (ed). *Geology of Coal Fires: Case Studies from Around the World*. The Geological Society of America: 155–175.
- Kaymakçi E, Didari V. 2002. Relations between coal properties and spontaneous combustion parameters. *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences*, 26: 59–64.
- Kuenzer C, Stracher G B. 2012. Geomorphology of coal seam fires. *Geomorphology*, 138: 209–222.
- Kutzbach J E, Prell W L, Ruddiman W F. 1993. Sensitivity of Eurasian climate to surface uplift of the Tibetan Plateau. *The Journal of Geology*, 101: 177–190.
- Li J J, Fang X M, Ma H Z, Zhu J J, Pan B T, Chen H L. 1996. Geomorphologic and environmental evolution in the upper reaches of the Yellow River during the Late Cenozoic. *Science in China D: Earth Sciences*, 39(4): 380–390.
- Lin A M, Yang Z Y, Sun Z M, Yang T S. 2001. How and when did the Yellow River develop its square bend? *Geology*, (10): 951–954.
- Lohrer C, Schmidt M, Krause U. 2005. Influence of Environmental Parameters on the Self Ignition of Coal. ERSEC Coal Fire Conference, Beijing, China, 110–112.
- Manabe S, Broccoli A J. 1990. Mountains and arid climates of middle latitudes. *Science*, 247: 192–195.
- Misra B K, Singh B D. 1994. Susceptibility to spontaneous combustion of Indian coals and lignites: an organic petrographic autopsy. *International Journal of Coal Geology*, 25(3): 265–286.
- Molnar P, Ghose S. 2000. Seismic moments of major earthquakes and the rate of shortening across the Tien Shan. *Geophysical Research Letters*, 27(16): 2377–2380.
- Novikov I, Sokol E. 2007. Combustion metamorphic events as age markers of orogenic movements in Central Asia. *Acta Petrologica Sinica*, 23: 1561–1572.
- Onifade M, Genc B. 2018. Spontaneous combustion of coals and coal-shales. *International Journal of Mining Science and Technology*, 28: 933–940.
- Querol X, Izquierdo M, Monfort E, Alvarez E, Font O, Moreno T, Alastuey A, Zhuang X, Lu W, Wang Y. 2008. Environmental characterization of burnt coal gangue banks at Yangquan, Shanxi Province, China. *International Journal of Coal Geology*, 75(2): 93–104.
- Reiners P W, Riihimäki C A, Heffern E L. 2011. Clinker geochronology, the first glacial maximum, and landscape evolution in the northern Rockies. *GSA Today*, 21: 4–9.
- Riihimäki C A, Reiners P W, Heffern E L. 2009. Climate control on Quaternary coal fires and landscape evolution, Powder River basin, Wyoming and *Montana*. *Geology*, 37: 255–258.
- Sokol E V, Novikova S A, Alekseev D V, Travin A V. 2014. Natural coal fires in the Kuznetsk Coal Basin: geologic causes, climate, and age. *Russian Geology and Geophysics*, 55: 1043–1064.
- Stracher G B, Prakash A, Sokol E V. 2015. Case studies: coal fires. In: Stracher G B, Prakash A, Sokol E V (eds). *Coal and Peat Fires: A Global Perspective*. Amsterdam: Elsevier, 1–786.
- Westaway R. 2009. Active crustal deformation beyond the SE margin of the Tibetan Plateau: constraints from the evolution of fluvial systems. *Global and Planetary Change*, 68(4): 395–417.
- Wang H H, Dlugogorski B Z, Kennedy E M. 2003. Coal oxidation at low temperatures: oxygen consumption, oxidation products, reaction mechanism and kinetic modelling. *Progress in Energy and Combustion Science*, 29(6): 487–513.
- Zhang Y, Zhang X Q, Hower J C, Hu S R. 2020. Mineralogical and geochemical characteristics of pyrometamorphic rocks induced by coal fires in Junggar Basin, Xinjiang, China. *Journal of Geochemical Exploration*, 213: 106511.

(责任编辑 李新坡)