

Karszt az üvegházban

TELBISZ TAMÁS

Napjainkban szinte valamennyi természettudomány igyekszik kapcsolatba hozni magát az üvegházhatással vagy annak következményeivel. (Az igyekezet persze sokszor nem teljesen önzetlen.) Ez jól jelzi, hogy a konzervatívnak tartott tudósvilág is ugyanúgy keresztülsöpörnek a divathullámok, mint az élet más területein. Nem csoda, hogy a karsztkutatók is több fontos ponton bekapcsolódtak az üvegházhatás vizsgálatába. E kutatások két nyomvonalon futnak:

1. A karsztok CO_2 -nyelő és -kibocsátó képességük révén szerepet játszanak a globális szénkörforgásban, amely az üvegházhatás szempontjából kiemelkedő fontosságú;

2. A negyedidőszak gyakori éghajlatváltozásainak nyomonkövetésében hatalmas segítséget jelenthet a barlangi cseppkövek mélyreható vizsgálata. Részletes adatok birtokában esély nyílik a klímaváltozások jobb megértésére, például oly módon, hogy a számítógépes éghajlati modelleket lefuttatjuk múltbéli időszakokra, és az így kapott értékeket összevetjük a negyedidőszak éghajlatáról szerzett ismereteinkkel. Az éghajlatmodellek tökéletesítése viszont a mai adatokból kiinduló pontosabb előrejelzést teszi majd lehetővé.

Mindenekelőtt azonban tekintsük át a karsztosodás számunkra fontos folyamatait.

Oldás és kicsapódás

Talán ez az ellentétpár fejezi ki legjobban a karsztban lejárló folyamatokat. Az oldás meghatározó a karrok, töbrök, barlangok kifejlődésében, a kicsapódás pedig a cseppkő- és az édesvízi mészkőképződés fő tényezője. Mindehhez természetes vizekben „elég jól” oldódó kőzet szükséges. A legjelentősebbek a karbonátos kőzetek (mészkő: CaCO_3 , dolomit: $(\text{Ca}, \text{Mg})\text{CO}_3$). Nyilván oldószere is szükség van, azaz kellő mennyiségű csapadékra. Csakhogy a tiszta (desztillált) víz önmagában igen kis mértékben oldja a mészkövet. Ehelyett a *hidro-karbonátos oldás* a döntő jelentőségű. A levegővel érintkező víz oldja a levegő CO_2 -tartalmát (1), majd a vízben oldott CO_2 a vízzel mészagresszív szénsavat alkot (2), és így oldja a kalcium-karbonátot (3).

(1) $\text{CO}_2(\text{légköri}) + \text{CO}_2(\text{oldott})$

(2) $\text{CO}_2(\text{oldott}) + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{H}_2\text{CO}_3$

(3) $\text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{CO}_3 \leftrightarrow \text{Ca}^{2+} + 2\text{HCO}_3^-$

Mindhárom egyenlet a környezeti feltételektől (hőmérséklet, nyomás, CO_2 részleges nyomása) függő egyensúlyi folyamatot jelképez. A folyamatsor irányát leginkább a CO_2 részleges nyomása (vagyis, hogy a levegőnek hányadrészt alkotja a CO_2) határozza meg. Ha több CO_2 áll rendelkezésre, mint amennyi az egyensúlyhoz szükséges, akkor az oldás felé tolódik el a folyamatsor, ha viszont kevesebb a CO_2 , akkor a kicsapódás lesz jellemző. Ez rendkívül fontos megállapítás, mert ha nő a CO_2 aránya, akkor nő az oldódás is, melynek során a CO_2 lekötődik, tehát a karsztok CO_2 -fogyasztó szerepe lesz jelentősebb. Ha viszont csökken a CO_2 aránya, akkor a kicsapódás válik hangsúlyossá, amely CO_2 -felszabadulással jár, azaz a karsztok CO_2 -termelő szerepe érvényesül.

Persze ez nem ennyire közvetlenül valósul meg. A nyílt légkör részleges CO_2 -nyomása ugyanis mindössze 0,033%, ami csak csekély mértékű karsztosodást tenne lehetővé. Ám a karszttalajok pórusait kitöltő levegő CO_2 -tartalma 0,04–11%-ig változhat (elsősorban az éghajlattól függően), amelynek kb. 40%-a növényi légzésből, kb. 60%-a pedig a talajban élő mikroorganizmusok tevékenységéből származik. A 60–70-es évek heves vitái nyomán mára egyértelművé vált, hogy a karsztosodásban a növényzet (elsősorban talajra gyakorolt hatásán keresztül) meghatározó szerepű. A növényzet életfeltételei viszont nagymértékben az éghajlattól függenek: legkedvezőbbek a nedves, trópusi övben, majd a mérsékelt öv csapadékosabb vidékein, míg a hideg öv és a száraz sivatagi területek jelentik a legmostohább körülményeket a növényzet, így a karsztosodás számára is. A következőkben kiderül az is, hogy nemcsak az éghajlat befolyásolja a karsztosodást, hanem a karsztosodás is az éghajlatot.

A szénkörforgás sodrában

A karbonátos kőzetek oldódásának és kicsapódásának éghajlatformáló szerepét már korábban is felismerték. Óriási mennyiségű mészkő kicsapódása tetemes CO_2 -felszabadulással, tehát felmelegedéssel jár, míg a felerősödő oldásfolyamatok CO_2 -elnyeléssel, azaz lehűléssel

párosulnak. A kréta időszaki felmelegedést, vagy a permo-karbon lehűlést manapság éppen ezzel a tényezővel próbálják megmagyarázni.

Arra azonban eddig nemigen gondoltak, hogy a karsztfolyamatok hatása emberi léptékben mérve is befolyásolja a szénkörforgást. Mióta köztudottá vált, hogy fejünk felett lebeg a légköri CO_2 -mennyiség növekedésének következtében fokozódó üvegházhatás réme, széles körű nyomonkövetés indult a szénkörforgás legapróbb összetevőinek meghatározására is. A rengeteg mérés és elméleti megfontolás ellenére a légkörből évente elnyelt szénmennyiségből 38,12·10⁸ t még mindig magyarázatra szorul. Ezt a hiányt próbálják meg – legalább részben – betömködni a karsztkutatók. A jelenleg ismert becslések szerint e hiány 10–15%-a megmagyarázható a Föld kiterjedt karsztvidékein zajló oldásos folyamatokkal.

A karsztfolyamatok által elnyelt szénmennyiség fenti becslése a következő elméleti megfontolások alapján született: az (1), (2) és (3) egyenlet alapján 1 mól oldott CaCO_3 -ra 1 mól, levegőből elnyelt CO_2 jut. Bár az állítás nem teljesen pontos, mert a vízben oldott CO_2 -nek csak egyik része fordítódik a mészkő oldására, a maradék az egyensúlyi feltételek miatt szükséges, ún. *tartozékos szénsav* formájában van jelen az oldatban, az egyszerűség kedvéért számításainkban mégis így járunk el. Ezek alapján mondhatjuk, hogy a légkörből elvont CO_2 és a feloldott mészkő mennyisége relatív atomtömegeik alapján aránylik egymáshoz, tehát minden egyes tonna oldott mészkőre 120 kg levegőből elvont szén jut. Vagyis a teljes Földre kiterjedő mészkőlepusztulást kell meghatároznunk ahhoz, hogy a karsztfolyamatok által elnyelt teljes szénmennyiséget megkaphassuk. Mivel a karbonátos kőzetek felszíni kibukkanásai mintegy 22 millió km²-t foglalnak el a szárazföldekből, és a számos különféle éghajlatú területre kiterjedő mérések súlyozott átlaga szerint a mészkő lepusztulása 236 t/km²/év (amelynek kb. 97,59%-a CaCO_3), így a globális mészkőlepusztulásra 3,067·10⁹ t/év adódik. Az ennek megfelelő globális szénelnyelés tehát 5,067·10⁹ t/év·120/1000 = 6,08·10⁸ t/év. Hasonló elven, de eltérő paraméterekkel számított becslések az előbbi érték 1/3-át említik.

Az eddigi becslések számos pontatlansága ellenére bizonyosnak látszik, hogy a karsztok nem elhanyagolhatók az üveg-házhatás szempontjából. De milyen is ez a hatás? Leegyszerűsítve állíthatjuk, hogy a karsztok mérséklék a CO_2 -mennyiség légkörbeli ingadozásait (a növekvő légköri CO_2 -koncentráció felerősödő oldást, tehát CO_2 -kivonást eredményez, és fordítva). Ha a valóságot jobban közelítő eredményt szeretnénk, más tényezőket is figyelembe kell venni. Elsősorban az éghajlatot, hiszen ez a karsztosodás egyik meghatározója. A kutatókra váró következő feladat az, hogy a globális éghajlati modellekbe beépítsék a karsztosodás éghajlattól függő szénelnyelő képességét.

Közismert, hogy az éghajlatváltozások és az óceánok vízszintje szoros kapcsolatban állnak egymással. A nagyobb mértékű tengerszint-ingadozások jelentősen módosíthatják a karbonátos kőzetek szárazföldi kiterjedését is. Egyes szerzők szerint a jégkorszakok során az alacsony tengervízszint miatt hatalmas, zömmel mészkőből felépülő korallzátonyok kerültek szárazra, amelyeknek összterületét $6 \cdot 10^5 \text{ km}^2$ -re becsülik, így a globális szénkörforgás mennyiségét is számottevően módosíthatták.

Létezik még egy rejtett kapcsolat a karsztok és a CO_2 -háztartás között. Régóta tudjuk, hogy a vulkánok CO_2 -ot juttatnak a légkörbe. Ez a CO_2 a földköpenyből származik. A feltörékvő gáz utat keres a földkérgen keresztül, és nemcsak a vulkánok vágta „csapásokon”, hanem az erősen töredezett mészkőösszletekben is felfelé hatol. Mivel ez utóbbiak jellemzője, hogy a törésrendszert általában karsztvíz tölti ki, ezért már a mélyben lejátszódik az oldásfolyamat, és a mélységi eredetű CO_2 hidrotermális karsztvizekben oldva kerül a felszínre. Mivel a nyílt légkör részleges CO_2 -nyomása lényegesen kisebb, a forró karsztvízből azonnal elillan a CO_2 -gáz, és kicsapódik a mésztartalom, látványos édesvízi mészkőlerakódásokat építve. Ebben a folyamatban tehát a mélységi CO_2 „felszínre közvetítése” révén a karszt mint CO_2 -forrás játszik szerepet a szénkörforgásban. Ez a lenyűgöző formákat eredményező jelenség széles körben elterjedt a világon.

Évgyűrűk és cseppkővek

A negyedidőszak éghajlatváltozásairól alkotott képünk árnyaltabbá válik. A változatos vizsgálati módszerek mellé mostanában kezd felsorakozni a cseppkővek alapján végzett őséghajlat-meghatározás. Mi a lényege ezeknek az új módszereknek?

1. Mivel a földtörténeti múlt megismerése hiányos kirakós játékokra emlékeztet, minden egyes új darab megerősítheti,

vagy éppen cáfolhatja a korábbi eredményeket.

2. Vannak olyan helyek, ahol nincs más lehetőség az őséghajlat tanulmányozására, mint a cseppkővek aprólékos elemzése.

3. Némelyik karsztvidéken előfordulnak több millió éves cseppkővek is, amelyek a teljes negyedidőszakot átfogó éghajlatváltozásokról tanúskodhatnak.

4. A cseppkővekből igen részletes felbontású adatok nyerhetők: gyakori az 1 éves vagy féléves időlépték, de egyes vizsgálatoknál megadható 3 napos időszakaszokra számított érték is!

Az őséghajlat meghatározásához szükség van a cseppkőből vett minta korának ismeretére, valamint egy olyan jellemző meghatározására, amely a klímával kapcsolatot. Az abszolút kormeghatározás a földtanban már jól bevált módszerekkel (radioaktív izotópok aránya, U-hasadási nyomok számolása, termolumineszcencia stb.) történik. A relatív kormeghatározásban viszont a cseppkőveknek az a sajátossága segít, hogy a fákhhoz hasonlóan évgyűrűkre tagolhatók. Ki hinné, hogy a barlangok állandó sötétjében, kiegyenlített hőmérsékletén a kinti időjárás hatással van a cseppkővek formálódására? Pedig így van: tízed, sőt század mm-es felbontásban szemlélve a cseppkővek keresztmetszetét apró fehérporózus és sötét-tömör csíkok (laminák) váltogatják egymást. Az előbbi a téli, az utóbbi pedig a nyári időszak terméke: ilyenkor megnő a talajban élő szervezetek aktivitása, több CO_2 termelődik, emiatt több mészkő oldódik, és jut a beszivárgó vizekkel a barlangba, ahol a bemosódó sötét színű szerves anyaggal együtt hozzájárul a sötét-tömör laminák kialakulásához.

Ezután tekintsük át az éghajlattal kapcsolatba hozható tulajdonságokat. Legegyszerűbb a cseppkőgyűrűk vastagságának mérése, ami a cseppkő éves növekedési rátáját adja meg. E növekedés egyértelműen a cseppkővet kialakító csepegési hely vízhozamával arányos, azaz közvetetten a terület csapadékmennyiségével. Nedves éghajlaton gyorsabb, száraz klímaperiódusok alatt lassabb növekedés, esetleg a csepegés teljes szünetelése jellemző. Hasonló tünetek figyelhetők meg a csepegési helyhez vezető repedésrendszer fokozatos eltömődésének következtében is, aminek általában nincs köze az éghajlat szárazodásához.

Egy bolgár barlangból származó cseppkő növekedési gyűrűinek elemzése érdekes felvetéshez vezetett: mintegy 7–8000 évvel ezelőtt a cseppkőnövekedési ráta 53-szorosan haladta meg a mai éghajlatnak megfelelő értéket (685 mm). Egyes kutatók szerint ez a gyors cseppkőhízással járó csapadékos időszak talán a bibliai

„özönvíz” természetföldrajzi magyarázatát adhatja.

Egy másik gyakran vizsgált tényező a cseppkővek $\delta^{18}\text{O}$ -izotóp-tartalma, mely a cseppkő keletkezésekor a barlangban uralkodó hőmérséklettel arányos: minél melegebb van, annál kisebb a $\delta^{18}\text{O}$ aránya. Konkrét függvényszerű kapcsolat azonban csak nehezen adható meg, mert a cseppkővek $\delta^{18}\text{O}$ -izotóp-arányát a barlangi hőmérsékleten kívül a beszivárgó vizek $\delta^{18}\text{O}$ -aránya is befolyásolja, ami nem csak a klímától függően változhat. (Szerencsés esetben azonban ezt becsülni lehet, például a cseppkőben megrekedt folyadékszárványok, vagy a beszivárgó víz származásának ismeretében.)

A növényzettel hozható összefüggésbe a $\delta^{13}\text{C}$ -izotóp cseppkővekben mért aránya. Némelyek véleménye szerint a mérési eredményekhez közvetlenül hozzárendelhetők bizonyos vegetációtípusok, mások egyszerűen a talajvastagsággal magyarázzák a $\delta^{13}\text{C}$ -izotóp arányát: vékony talaj esetén a nyílt levegő CO_2 -ja nagyobb szerepet játszik a mészkőoldásban, míg vastag talaj esetén a talajlevegő szerves eredetű CO_2 -ja válik meghatározóvá, ami a $\delta^{13}\text{C}$ -izotóp arányának növekedését eredményezi.

A vizsgálati módszerek közül utolsóként a lumineszcencia-méréseket említjük. Cseppkőképződéskor a talajból bemosódó lumineszkáló anyagok keverednek a kalcitkristályokhoz. A cseppkőmetszetek lumineszcencia-intenzitásának elemzése számítógépes képfeldolgozó programok segítségével rendkívüli részletességet tesz lehetővé: egyes kutatók 3 nap felbontású adatsorokat közölnek. Ezek az adatsorok elsősorban a naptevékenységről tájékoztatnak, szépen kirajzódnak az évszakos változások, a 11 éves ciklusok (a napfolttevékenység változásaival szinkronban) és a bonyolultabb ingadozások is.

Ezzel teljessé is vált az őséghajlat kutatására szolgáló eszköztárunk, hiszen a hőmérséklet, a csapadék, a vegetáció és a naptevékenység meghatározásához egyaránt bemutatunk vizsgálati lehetőségeket. *

IRODALOM

- Karst processes and the carbon cycle. Newsletter of IGCP 379 project – Institute of Karst Geology, Guilin, China
 Proceedings of the 10th International Congress of Speleology, 1989 – MKBT, Budapest
 YUAN DAOXIAN, 1997: The carbon cycle in karst – Zeitschrift für Geomorphologie, Juli, Berlin-Stuttgart, pp. 91–102.
 ZÁMBÓ LÁSZLÓ, 1993: A karsztosodó kőzetek alaklata – in: BORSY ZOLTÁN (szerk.): Általános természetföldrajz – Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest