



BOLYGÓNK LEGKITERJEDTEBB MAGASFENNSÍKJA

Tibet paleo- és neotektonikája

A kutatások alapján Földünk történetének eddig mintegy 60 százalékát ölelte fel a lemeztektonika működésének időszaka, mely során valószínűleg többször is kialakultak olyan nagy területű magassíkok, mint amilyen napjainkban a Tibeti-fennsík. Ezek a kiemelt területek nem csupán regionális szinten befolyásolták a természetföldrajzi folyamatokat, s egyúttal az élővilág evolúcióját, hanem globális szinten is hatást gyakoroltak az éghajlatra.

A magasplató

A Tibeti-plató, több mint kétmillió négyzetkilométeres kiterjedésével Földünk legnagyobb területű és átlagmagasságú fennsíkja. Területének közel nyolcvan százaléka háromezer méteres tengerszint feletti magasságban fekszik, 18,8 %-a pedig még 5000 méternél is magasabban fekvő terület [1]. A platót alkotó kéregblokkok keletkezésének története a földtörténeti ókorba nyúlik vissza, magának a topográfiai értelemben többé-kevésbé egységes magassíknak a kialakulása azonban a harmad-, illetve negyedidőszaki Eurázsiai-hegységképződéshez (orogenezis) kapcsolódik, melynek indo-ázsiai zónájában az Ausztrál–Indiai- és az Eurázsiai-közetlemez kollíziójából származó, észak-északnyugati irányú kompresszió hatására jelentős mértékű térrövidülés, kéregkivastagodás és nagy területek kiemelkedése ment végbe. A földkéreg és a földköpeny közötti határfelület a Mohorovičić-diszkontinuitás (MOHO) mélysége, azaz a kéregvastagság Tibet esetében hozzávetőlegesen kétszerese a kontinensek alatti globális átlagértéknek, átlagosan 60-75 km között változik, de egyes helyeken a 100 km-t is meghaladja (Nyugat-Tibet).

Tibet esetében a paleotektonika azon múltban zajló kéregdinamikai folyamatok összességét jelenti, melyek a fennsík kialakulásához vezettek. Neotektonikai mozgások alatt pedig az egymásnak feszülő kéregblokkok napjainkban is zajló elmozdulásai értendők.

A fennsík földtörténeti harmadidőszak (kainozoikum) előtti evolúcióját főként a Gondwana-őskontinensről származó terránok (Qiuangtang, Lhasa, és később India) kollíziói határozták meg. A harmad- és negyedidőszaki tektonikai fejlődéstörténetet pedig domináns módon az Indiai kontinentális típusú lemezrész Euráziával történt kollíziója és északi irányú mozgása alakította.

A kéregszegek paleotektonikai fejlődése

A Tibeti-földkéreg alapját képező szegek egykor a Gondwanához tartoztak. Ezek a földtörténeti középidőben (mezozoikum) kapcsolódtak az Eurázsiai kontinentális lemezhez, s az időszak fő geológiai eseményeit a hegységképződések mellett a tengeri üledékképződés jelentette. A harmad- és negyedidőszakot pedig a gyorsan kiemelkedő területek eróziójából származó törmelékanyag mélyebb térszíneken, medencékben történő települése jellemezte.

A Tibeti-fennsík úgynevezett multiterrán orogén öv, ami azt jelenti, hogy az egyes szerkezeti blokkok a geológiai múltban különálló kéregszerkezeti egységeket képeztek. A kéregblokkok több orogén fázis során a középidőben kapcsolódtak egymáshoz, azonban csak még később, az oligocén-miocén táján az indo-ázsiai orogenezis idején alkottak topográfiai értelemben egységes magasplató jellegű területet. Tibet fejlődéstörténete során szinte mindegyik ismert hegységképződés-típus képviseltette magát. A permtől a krétáig terjedő időszakban a Kunlun, Altin-Tagh blokkok, illetve a Qiangtang, és Lhasa terránok egymáshoz közeledése és kollíziója ment végbe. Ebben az időszakban az Alaszkában megfigyelt mikrolemez-tektonikához hasonló litoszféra-dinamikától az alpi-típusú át az Andok-típusú orogenezisig sokféle tectogén folyamat jellemezte a Tibeti földkéreg evolúcióját.

A paleotektonikai rekonstrukciók alapján a triászban a Tethys három ága is egyidejűleg létezett. A Paleo-Tethys déli és északi partja mentén, a Qiangtang terrán (QT) északi és a Songpan-Ganzi terrán (SG) déli peremén egyaránt szubdukció zajlott (Qiangtang-ív, Kunlun-ív). A QT és Lhasa (L) terránok közé ékelődő Mesotethys-óceán óceáni típusú litoszféra-lemeze az L terrán északi pereme alá bukott (Lhasa-ív). A Neotethys kinyíló óceánjának medencéje pedig az L terrán és a még a Gondwana őskontinenshez tartozó Indiai-szubkontinens között húzódott.

A Közép-Tibeti Qiangtang metamorf öv (QMB) a Föld egyik legnagyobb magas (HP), illetve ultranagy nyomású (near-UHP) kőzetöve. A QMB protolit kőzettestjei a Qiangtang terrán felső-paleozoikum kontinentális peremén keletkezett rétegeket és homokkővet is tartalmaznak, melyek egy a paleozoikumban létező, a Paleo-Tethys északi részén kialakult ív-terránról (PTAT) származtak [2]. A QMB-HP metamorfózis pedig a QT és a PTAT közötti kontinentális kollízió eredménye, amely egyidejű Dél- és Észak-Kína kontinentális típusú kéregrészeinek kollíziójával.

A QT a jura első felében csatlakozott az SG terránhoz és tulajdonképpen egyúttal Euráziához. A SG terrán medencéje több alkalommal is összeomlott és ismét kiemelkedett a QT jura kori akkréciója során.

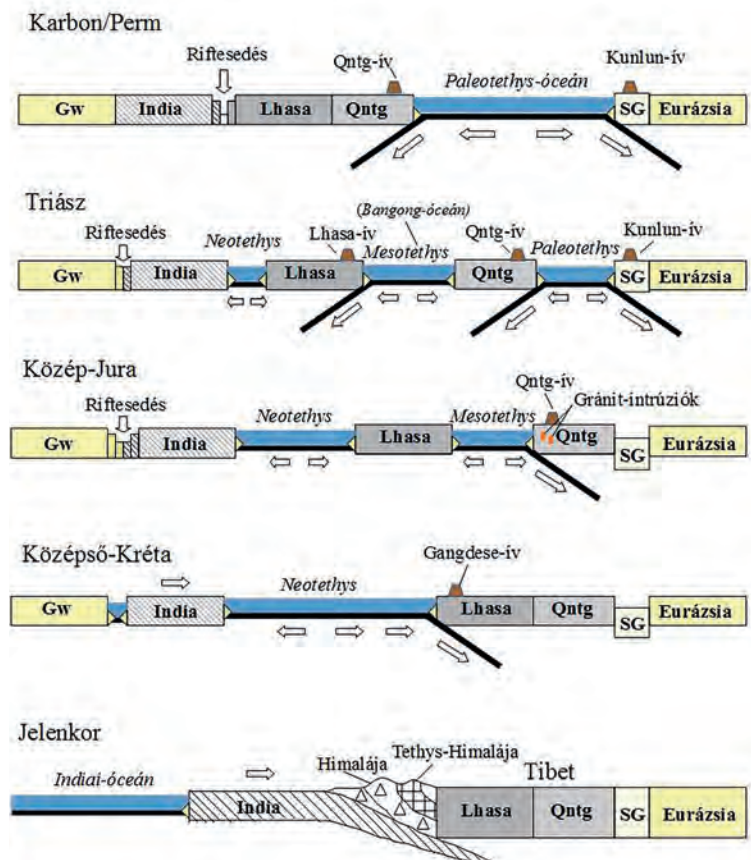
Nagyjából 120-130 millió éve jelentős magmatizmus zajlott az Indiai-lemez kontinentális részének északi peremén, amely több kutató szerint is egy, már a triászban megkezdődő riftinges folyamat keretében India Gondwana-tól

való elválásának kezdetét jelentette, s ekkortájt vette kezdetét az Indiai-szubkontinens északi irányú migrációja Ázsia felé [3].

A Lhasa terrán déli peremén elhelyezkedő Gangdese magmás öv a Neotethys-i óceáni litoszféra szubdukciója során alakult ki. Ennek tényét például a Lhasa-tól keletre található Yeba-formáció vulkáni kőzeteinek eredete, a korabeli magmás intrúziók és üledékes rétegsorok szintén megerősítik [4]. A dél-tibeti Sangri vulkáni kőzetcsoport geokémiai jellemzői igazolják egy további vulkáni hegységív, egy intra-óceáni vulkáni szigetív egykori létezését is. A Neotethys óceáni lemez szubdukciójának kezdeti fázisát jelzik ezek a kőzetformációk [5].

Az egyes terránok geológiai felépítése meglehetősen változatos képet mutat. A Lhasa terrán például különösen gazdag intruzív-magmás eredetű kőzettestekben. A Gangdese-ív vulkáni kőzetei mellett érdekes képződmény például a Nam Co környéki denudációs síkságok (peneplain) mentén a Bangoin batoli komplexum 118-85 millió évvel ezelőtt keletkezett intruzív kőzettestei [6].

1. ábra. A Tibeti-fennsíkot alkotó kéregszegmensek paleotektonikai fejlődéstörténetének sematikus vázlata



Az 50-35 millió évvel ezelőtti időszakban az Ausztrál-Indiai-lemez mozgási sebessége jelentős mértékben megváltozott, a konvergencia 15-ről 4 cm/év értékre csökkent, ami az Indiai- és az Eurázsiai-lemez kollíziójának hatására következett be. A Tibet alatti kéreg kivastagodása is az Indiai-lemez sebességcsökkenése idején vált dominánssá.

A gyors kora-eocén–oligocén üledékképződés jelzi az indo-ázsiai kollízió általi kéregdeformációt Észak-kelet-Tibet medencéiben, így például a Qajdam-medencében is, ahol a kainozoikumi üledéksor 5-14 km vastag [7].

A kollíziót követően a mai Tibet nagy részén, az egyes zónákon belül nagy területen zajlott a kiemelkedés. A fennsík keleti peremét felszabdalo folyók szurdokvölgyei közül a Dadu-folyóé a legkeletibb bevágódás.



2. ábra. Tibet fő kéregszerkezeti egységei, a törések menti elmozdulások irányainak megjelölésével

Vizsgálatok szerint a Dadu mintegy 10 millió éve kezdődő és máig folytatódó gyors bevágódási rátája 0,33 km/év, ami összhangban van a nagy területen végbe ment regionális emelkedéssel [8].

A nagy léptékű topográfijában egységes, nagy területű magassfennsík kialakulásában fontos szerepet játszott a multiterrán kéregszerkezet, mivel az Ausztrál–Indiai-lemez mozgása által megnyilvánuló kompresszió időszakában segítette a kéregblokkok napjainkban is zajló törések menti elmozdulását, a kéreg kivastagodáshoz nagymértékben hozzájáruló térrövidülést.

A földtörténeti múltban a hatalmas hegységképződések idején nagy valószínűséggel léteztek a Tibethez, vagy a bolíviai Altiplano-hoz hasonló, nagyobb

területű magassfennsíkok, melyek kérgé idővel kitágult, s a megtámasztásukat biztosító erők megszűnésével fokozatosan összeomlottak. A nagy kiterjedésű magasplatók létrejötte a földtörténet nagy tektonikai ciklusaihoz kapcsolódó hegységképződések egyik velejárója lehet. Kialakulásuk feltételrendszere viszont meglehetősen komplex, így megszületésük nem lehet törvényszerű, hanem csupán adott esetben fejlődhetnek ki az orogén ciklusok idején.

Törérendszer és Tibet neotektonikája

A Himalája alatt meghajlik az indiai litoszféra-lemez, ez pedig regionálisan ellensúlyozza a hegység hatalmas súlyát. A kéreg itt alig több mint 55 km vastag, holott a számítások szerint mintegy 80 km-es kéregvastagságra volna szükség a hegység alátámasztásához. A Himalája nagy magasságának oka részben a viszonylag erős indiai kontinentális típusú litoszféra regionális ellensúlyozásában, másrészt annak északra történő mozgásából eredő horizontális irányú erőkben rejlik. Ezzel szemben a Tibeti-fennsík hatalmas súlyát a vastag kéregre ható felhajtóerő ellensúlyozza, azonban a kompenzációhoz szükség van az indiai lemez mozgásából adódó kompresszió hatására is. Ez utóbbi jelenleg megakadályozza a Tibeti-kéreg észak-déli irányú tágulását, s a fennsík összeomlását. A déli,

északi, valamint a nyugati peremeken térrövidülés tapasztalható, a plató keleti peremén és egyes belső területein azonban a vizsgálatok szerint tágulást (extenziót) eredményező erők hatnak. Tibet nem viselkedik egységes, merev lemezként, hanem tektonikailag komplex rendszert alkot.

A Tarim-medence alatti litoszféra merev blokkot képez, mely ellenáll a Nyugat-Tibeti plató északi irányú expanziójának [9]. Az erős ázsiai kontinentális kéreg valójában gátolni „igyekszik” a plató formálódását, míg az aktív orogén övben nyilvánul meg a térrövidülés. Az indo-ázsiai kollíziós zóna mentén a litoszféra deformációja, mélyszerkezeti jellemzőinek alakulása az indiai lemez mozgásából eredő kompresszió mellett az ázsiai kontinentális kéreg erősségének a függvénye.

A Himalájai–Tibeti orogén aktív tektonikájú terület, amely egymással kölcsönhatásban lévő vetők



3. ábra. A Lhasa terránon, Lhasa-tól 280 km-re keletre, 3470 méteres tengerszint feletti magasságban fekvő Basum Tso-tó talán Tibet legfestőibb tava

komplex rendszerét foglalja magában. Némelyikük hossza az 1500-2000 km-t is meghaladja (pl. Altyn-Tagh vetődés). A törések mentén, napjainkban is zajló tektonikai folyamatok alapvető fontosságúak a tibeti földkéreg evolúciójában, a Karakoram-törés például a Föld egyik legnagyobb csúsztásos–vetődéses (strike–slip) törésrendszere, mely fontos szerepet játszik az ázsiai kéreg deformációjában. A régió mély törésrendszerei az indo-ázsiai kollíziót követően viszonylag hamar kialakultak. Fontos szerepet játszottak a kéregkivastagodásban, valamint a plató folyamatos emelkedésében a késő-eocén és a kora-miocén között, mely időszakban a törésrendszerek aktivitása a legnagyobb volt Tibet területén [10].

A Tibet középső részén 2016-2017 között kipattant kis és közepes erősségű, 0-8 km fészekmélységű földrengések, s a térség 3 magnitúdónál erősebb rengéseinek vizsgálata is egyértelműen jelzi, hogy a felső kéreg tektonikailag aktív, s a magas fennsík még napjainkban is az észak-északkelet felé nyomuló Indiai-lemez mozgásából származó erős nyomóerők hatása alatt áll.

A földrengés-gyakoriság jelzi, hogy a Himalája és Dél-Tibet a Föld legaktívabb orogén régiója. A megvastagodott kontinentális kéreg alsó részében kipattanó földrengések kiváltó mechanizmusa azonban a legújabb kutatások szerint nem csak a mély törések menti elmozdulás lehet. A részben szubdukált Ausztrál–Indiai-lemez domináns alkotója az erősen metamorfizált granulitos kőzet, amely nagy mélységben,

az eklogit stabilitási zónájában ásványi fázisátalakuláson megy át. Az átalakulás hatására a közettömeget mikrorepedések járják át, melyek később fokozatosan makroszkopikus törések kialakulásához vezetnek [11].

A fennsík északkeleti pereme szintén aktív tektonikai régió, ahol a kéregdeformáció főként törések, csúsztásos vetődések mentén történik. Geológiai vizsgálatok, valamint GPS-mérések megerősítik a kéregben bekövetkező észak-északkelet–dél-délnyugati irányú térrövidülést az északkeleti Tibeti-platón keresztül, mely néhány aktív törés mentén történik, alacsony csúsztási ráták mellett ($0 \leq 1$ mm/év) [12]. Folytatódik tehát a plató északkeleti irányú növekedése, melyet a törések menti elmozdulások mellett gyűrődéses folyamatok is alátámasztanak az Északi Qilian Shan-medence (Hexi Corridor) északkeleti pereme mentén [12]. (A Hexi Corridor magában foglalja a Yumen- és Jiuguan-medencéket is.)

A kéregmozgások 1991-1998 között végzett GPS-méréseinek tanúsága szerint a Tibeti-plató keleti része és az annak előterében fekvő dél-kínai területek 6-10 mm/év



sebességgel mozognak kelet-északkeleti irányban, ami egyértelműen jelzi a keleti irányú mozgást a platón belül [13].

Kelet-Tibetre a komplex kéregszerkezeti deformáció és geodinamikai folyamatok jellemzőek. Az Ausztrál–Indiai-lemez szubdukciója következtében EHS (Eastern Himalaya Syntaxis) és LT teljes kéregszerkezetben deformált, míg a QT, ICB (Indo-China Block) és SG terránok deformációját főként a törések menti elmozdulások, valamint a platót alkotó kéregtömbök nyugat–kelet irányú mozgása határozzák meg [14].

A magasfennsíkok és az éghajlat

Az elmúlt évtizedekben elvégzett számítógépes szimulációk rámutatnak, hogy a kontinensek elhelyezkedése jelentős hatással lehet az éghajlatra, a szárazföldök helyzetének megváltozása ugyanis például az óceáni áramlásrendszerek megváltozását eredményezheti. Fény derült arra is, hogy a geológiai időléptékben mérve gyors topográfiai változások is jelentős éghajlatmódosító tényezők lehetnek, s az olyan kiterjedt fennsíkok kiemelkedése, mint amilyen Tibet is, nem csupán helyi változásokat idézhetnek elő. Az éghajlat 40 millió évvel ezelőtt a mainál melegebb és csapadékosabb volt, ami azóta szignifikáns mértékben lehűlt, ez pedig összhangban van az Észak-Amerikában, a kaliforniai Sierra Nevadától a Sziklás-hegységig terjedő kiemelkedett területek (Basin and Range, Colorado-fennsík), valamint a Tibeti-fennsík kiemelkedésének időrendjével.

Éghajlati szimulációk segítségével készített modellek előrejelzései és egyéb bizonyítékok alapján a kelet-ázsiai nyári és téli monszun, valamint a belső-ázsiai területek elsivatagosodásának 25–20 millió évvel ezelőtt kezdődő fokozódása kapcsolatba hozható Tibet északi részeinek kiemelkedésével [15].

A Tibeti-plató dinamikus összhangot teremt a közepes szélességek és a trópusi régió éghajlati zónái között. E dinamikus csatolás vektorai hideg légáramlatok, melyek befolyásolják a légköri konvekciót a Bengáli-öböl északi része, Dél-kelet-Ázsia szárazföldi területei, valamint Indonézia felett. Tibet és az egész indo-ázsiai orogén öv tehát nem csak regionális szinten befolyásolja az éghajlati viszonyokat, hanem hatással van a globális klímára is.

A nagy kiterjedésű magasfennsíkok beható tanulmányozása az egyes földtudományi, illetve az ahhoz tudományterületek kutatómódszereivel kiemelt jelentőségű kell, hogy legyen, mert a magasplatók nem csupán helyi szinten, de globális viszonylatban is hatással vannak a természetföldrajzi folyamatokra.

Ezáltal jobban megérthetjük a bolygónk működését meghatározó folyamatokat is, mivel a kiterjedt magasfennsíkok azok aktív szereplői, illetve az azokat leginkább befolyásoló tényezők közé tartoznak.

FUTÓ PÉTER

IRODALOM

Nyitóképek: A Tibeti-fennsík a világűrben (Forrás: NASA)

- [1] Pu Z. et al. (2007): MODIS/Terra observed seasonal variations of snow cover over the Tibetan Plateau. *Geophysical Research Letters*, 34, L06706.
- [2] Pullen A. et al. (2008): Triassic continental subduction in central Tibet and Mediterranean-style closure of the Paleo-Tethys Ocean. *Geology*, 36, 351-354.
- [3] Gehrels G. et al. (2011): Detrital zircon geochronology of pre Tertiary strata in the Tibetan-Himalayan orogen. *Tectonics*, 30, TC5016.
- [4] Chen X. et al. (2019): Contrasting arc magma fertilities in the Gangdese belt, Southern Tibet: Evidence from geochemical variations of Jurassic volcanic rocks. *Lithos*, 324-325, 789-802.
- [5] Huang F. et al. (2015): Early Jurassic volcanic rocks from the Yeba Formation and Sangri Group: Products of continental marginal arc and intra-oceanic arc during the subduction of Neo-Tethys Ocean? *Acta Petrologica Sinica*, 7, 2089-2100.
- [6] Haider V. L. et al. (2013): Cretaceous to Cenozoic evolution of the northern Lhasa Terrane and the Early Paleogene development of peneplains at Nam Co, Tibetan Plateau. *Journal of Asian Earth Sciences*, 70, 79-98.
- [7] Bush M. A. et al. (2016): Growth of the Qaidam Basin during Cenozoic exhumation in the northern Tibetan Plateau: Inferences from depositional patterns and multiproxy detrital provenance signatures. *Lithosphere*, 1, 58-82.
- [8] Quimet W. et al. (2010): Regional incision of the eastern margin of the Tibetan Plateau. *Lithosphere*, 1, 50-63.
- [9] England P., Houseman G. (1985): Role of lithospheric strength heterogeneities in the tectonics of Tibet and neighbouring regions. *Nature*, 315, 297-301.
- [10] Wu Z. et al. (2013): Early Cenozoic Multiple Thrust in the Tibetan Plateau. *Journal of Geological Research*, 784361.
- [11] Shi F. et al. (2018): Lower-crustal earthquakes in southern Tibet are linked to eclogitization of dry metastable granulite. *Nature Communications*, 9, 3483.
- [12] Zheng W.-J. et al. (2013): Late Quaternary slip rates of the thrust faults in western Hexi Corridor (Northern Qilian Shan, China) and their implications for northeastward growth of the Tibetan Plateau. *Geosphere*, 9, 2, 342-354.
- [13] Chen Z. et al. (2000): Global Positioning System measurements from eastern Tibet and their implications for India/Eurasia intercontinental deformation. *Journal of Geophysical Research*, 105, 16215-16227.
- [14] Wu T. et al. (2019): Complex deformation within the crust and upper mantle beneath SE Tibet revealed by anisotropic Rayleigh wave tomography. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 286, 165-178.
- [15] Tada R. et al. (2016): Evolution and variability of the Asian monsoon and its potential linkage with uplift of the Himalaya and Tibetan Plateau. *Progress in Earth and Planetary Science*, 34.

KÖVETKEZŐ SZÁMUNK TARTALMÁBÓL

CSABA GYÖRGY: Olvasónapló –

A bölcs ember ostoba istenné válása

FARKAS CSABA: Madaraink és az éghajlatváltozás – Délről érkező hódítók

TÓSZEGI ZSUZSANNA: Interjú Máté Bencével, az Év Természetfotója készítőjével